



What Science  
Can Tell Us

# Agua para los Bosques y la Sociedad en el Mediterráneo

– Un difícil equilibrio

Yves Birot, Carlos Gracia y Marc Palahí (editores)



# What Science Can Tell Us

Marc Palahí, Editor-In-Chief  
Minna Korhonen, Managing Editor  
The editorial office can be contacted at [publications@efi.int](mailto:publications@efi.int)

Layout: Kopijyvä Oy / Janne Kuivalainen  
Printing: Kopijyvä Oy

Disclaimer: This volume has been developed with the support of the SylvaMED Project “Mediterranean forests for all”, with the financial contribution of the European Union through its European Regional Development Fund and the Programme MED. The views expressed are those of the authors and do not necessarily represent those of the European Forest Institute or the European Union.

ISBN 978-952-5453-87-4 (printed)  
ISBN 978-952-5453-88-1 (pdf)



EUROPEAN FOREST INSTITUTE

What Science  
Can Tell Us

# Agua para los Bosques y la Sociedad en el Mediterráneo

– Un difícil equilibrio

Yves Birot, Carlos Gracia y Marc Palahi (editores)



Projet cofinancé par le Fonds Européen  
de Développement Régional  
Project cofinanced by the European  
Regional Development Fund





# Índice

<b>Autores que han contribuido .....</b>	<b>7</b>
<b>Prefacio.....</b>	<b>9</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>11</b>
<i>Yves Birot y Carlos Gracia</i>	
<b>1. Puntos básicos .....</b>	<b>15</b>
1.1. Una visión general del ciclo hidrológico: Agua verde y agua azul.....	17
<i>Yves Birot y Carlos Gracia</i>	
1.2. Los recursos hídricos y forestales y la población del Mediterráneo: situación actual.....	22
<i>Gaëlle Thivet y Mohammed Blinda</i>	
1.3. Las áreas forestales ¿influyen sobre el régimen de lluvias?.....	32
<i>Giorgio Matteucci, Jerry Vanclay y Javier Martin-Vidé</i>	
1.4. Flujos hídricos en los bosques.....	38
<i>Jorge S. David, Juan Bellot, Yves Birot y Teresa S. David</i>	
1.5. El papel del bosque mediterráneo en la conservación del suelo y del agua .....	44
<i>Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante y Hedi Hamrouni</i>	
<b>2. El agua azul.....</b>	<b>55</b>
2.1. Hidrología de los ecosistemas mediterráneos.....	57
<i>Francesc Gallart y Pedro Berliner</i>	
2.2. Los recursos hidrológicos dependen de la cubierta vegetal y del uso del suelo .....	61
<i>Mark Robinson y Claude Cosandey</i>	
<b>3. Agua verde.....</b>	<b>67</b>
3.1. El agua verde para mantener los procesos de los ecosistemas forestales y sus funciones .....	69
<i>Yves Birot y Ramón Vallejo</i>	
3.2. Los procesos del agua en los árboles: transpiración y fotosíntesis .....	74
<i>Santiago Sabaté y Carlos A. Gracia</i>	
3.3. Cómo combaten el estrés hídrico las plantas .....	79
<i>Oliver Brendel y Hervé Cochard</i>	

<b>4. Agua azul y/o agua verde: ¿dónde está el compromiso?</b> .....	<b>85</b>
4.1. Garantizar el agua para los árboles y para las personas: posibles escenarios .....	87
<i>Carlos Gracia, Jerry Vanclay, Hamed Daly, Santi Sabaté y Javier Gyenge</i>	
4.2. Agua para los ecosistemas, los bienes y servicios y para las personas .....	97
<i>Robert Mavsar</i>	
4.3. Gestión integrada del agua a escala del paisaje: la ciencia como base del desarrollo – Un caso de estudio en Túnez.....	103
<i>Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante y Hedi Hamrouni</i>	
4.4. Hacia una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica integrada .....	110
<i>Bart Muys, Paolo Ceci, Thomas Hofer y Claudia Veith</i>	
4.5. La huella del agua en nuestra vida diaria: cuánta agua utilizamos? .....	120
<i>Yves Birot</i>	
4.6. Lecciones extraídas del pasado: perspectiva histórica de la hidrología forestal y la conservación del suelo al norte y al sur de la cuenca mediterránea .....	127
<i>Pietro Piussi, Yves Birot, Éric Roose y Mohamed Sabir</i>	
<b>5. Retos clave</b> .....	<b>135</b>
5.1. Implicaciones del cambio climático sobre los bosques y la hidrología: una visión general .....	137
<i>Javier Martin-Vidé, Francesc Gallart y Joan-Albert Lopez-Bustins</i>	
5.2. Afrontar el aumento de población y el cambio de uso del suelo.....	143
<i>Gaëlle Thivet</i>	
5.3. La aforestación para combatir la desertización de las zonas áridas exige aunar esfuerzos .....	151
<i>Orna Reisman-Berman, Leopoldo Rojo y Pedro Berliner</i>	
5.4. Mantener saludables los ecosistemas acuáticos y de ribera del Mediterráneo: retos y soluciones mediante la gestión de los bosques de ribera .....	158
<i>Francesc Sabater y Susana Bernal</i>	
5.5. Economía del agua y los bosques: cuestiones y recomendaciones políticas .....	164
<i>Lelia Croitoru y Mike Young</i>	
<b>Recopilación de los mensajes clave</b> .....	<b>171</b>
<b>Glosario</b> .....	<b>182</b>

# Autores que han contribuido

Jean Albergel, IRD, Nairobi, Kenia  
Juan Bellot, Universidad de Alicante, España  
Pedro Berliner, University Ben Gurion, Blaustein Institute for Desert Research, Israel  
Susana Bernal, Universidad de Barcelona, España  
Yves Birot, EFIMED, Avignon, Francia  
Mohamed Blinda, Plan Bleu-UNEP, Sophia-Antipolis, Francia  
Oliver Brendel, INRA, Nancy, Francia  
Paolo Ceci, FAO, Roma, Italia  
Hervé Cochard, INRA, Clermont-Ferrand, Francia  
Jean Collinet, IRD, Francia  
Claude Cosandey, CNRS, Paris, Francia  
Leila Croitoru, The World Bank, Washington DC, EEUU  
Hamed Daly, INRGREF, Túnez, Túnez  
Francesc Gallart, CSIC, Barcelona, España  
Carlos Gracia, CREA-UB, Barcelona, España  
Javier Gyengé, INTA, Bariloche, Argentina  
Hedi Hamrouni, Ministry of Agriculture and Water Resources, Túnez, Túnez  
Thomas Hofer, FAO, Roma, Italia  
Joan A. Lopez-Bustins, Universidad de Barcelona, España  
Javier Martin-Vidé, Universidad de Barcelona, España  
Giorgio Matteucci, CNR-ISAFOM & IBAF, Rende, Italia  
Robert Mavsar, CTFC/EFIMED, Barcelona, España  
Bart Muys, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica  
Pietro Piussi, University of Florence, Italia  
Orna Reisman-Berman, Blaustein Institute for Desert Research, Sode Boger, Israel  
Mark Robinson, CEH, Wallingford, Reino Unido  
Leopoldo Rojo, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España  
Eric Roose, IRD, Montpellier, Francia  
Santiago Sabaté, CREA-UB, Barcelona, España  
Francesc Sabater, Universidad de Barcelona, España  
Mohamed Sabir, ENFI, Rabat, Marruecos  
Jorge Soares David, ISA, Lisbon, Portugal  
Teresa Soares David, INRB, Oeiras, Portugal  
Ramón Vallejo, Universidad de Barcelona, España

Jerry Vanclay, Southern Cross University, Lismore, NSW, Australia

Claudia Veith, FAO, Roma, Italia

Mike Young, University of Adelaide, Australia

Patrick Zante, IRD, Rabat, Marruecos

### Comité de redacción

Javier Albarracín, IE-Med, Barcelona, España

Pedro Berliner, Ben Gurion University, Blaustein Institute for Desert Research, Israel

Yves Birot, coordinator, EFIMED, Aviñón, Francia

Michael Bredemeier, University of Göttingen, Alemania

Francesc Gallart, CSIC, Barcelona, España

Carlos Gracia, coordinador, CREA-UB, Barcelona, España

Thomas Hofer, FAO, Roma, Italia

Federico Magnani, University of Bologna, Italia

Javier Martín-Vidé, UB, Barcelona, España

Marc Palahí, coordinator, EFIMED, Barcelona, España

Pietro Piussi, University of Firenze, Italia

Irina Prokofieva, CTFC, Barcelona, España

Pere Riera, UAB, Barcelona, España

Gaëlle Thivet, Plan Bleu-UNEP, Marsella, Francia

Jerry Vanclay, Southern Cross University, Lismore, NSW, Australia

## Prefacio

**D**urante mucho tiempo, gestores forestales y responsables de la toma de decisiones han identificado la cuestión relacionada con los bosques y el agua como un punto clave en la gestión de los recursos naturales, teniendo en cuenta tanto las necesidades de la sociedad como las responsabilidades medioambientales. Hoy este tema recibe renovada atención tal y como se refleja en la serie de eventos internacionales dedicados a él (Cuadro 1). A pesar del progreso significativo en la comprensión científica de las interacciones entre bosques y agua, la incertidumbre –en algunos casos, confusión– persiste a causa de la complejidad del tema y las limitaciones a la hora de extrapolar los resultados de la investigación a contextos diversos: países y regiones, escalas geográficas, tipos de bosques y características geomorfológicas. Asimismo se ha producido un cierto fracaso al comunicar con efectividad los nuevos resultados científicos a los diseñadores de políticas, así como al cuestionar los puntos de vista más arraigados.

### Cuadro 1. Situación internacional de la agenda bosques y agua

La temática sobre las interacciones entre bosques y agua ha recibido una creciente atención a nivel internacional y ha cobrado ímpetu en los últimos años. A continuación se relacionan los eventos clave :

- “Encuentro Internacional de Expertos en Bosques y Agua”, Noviembre 2002, Shiga, Japón
- Año Internacional del Agua Dulce en 2003
- Aprobación de la Resolución 2 de Varsovia “Bosques y Agua” por la Conferencia Ministerial para la Protección de los Bosques de Europa (ahora, Bosque Europa), Noviembre 2007, Varsovia, Polonia
- 26ª Sesión del Grupo de Trabajo de la Comisión Forestal Europea sobre Ordenación de Cuencas Hidrográficas de Montaña, Agosto 2008, Oulu, Finlandia
- III Conferencia Internacional: Bosques y Agua, septiembre 2008, Mr gowo, Polonia
- Sesión Plenaria sobre Bosques y Agua durante la Semana del Bosque Europeo, octubre 2008, Roma, Italia
- Conferencia Internacional “Agua y Bosques: ¿una verdad incómoda?”, octubre 2008, Barcelona, España
- Taller sobre Bosques y Agua, mayo 2009, Antalya, Turquía
- Sesiones Bosques y Agua y Eventos Paralelos en el XIII Congreso Mundial Forestal, Octubre 2009, Buenos Aires, Argentina
- Sección “Bosques y Agua” de la 35ª Sesión de la Comisión Forestal Europea, Abril 2010, Lisboa, Portugal
- Sesión Plenaria sobre Bosques y Agua durante la 20ª sesión del Comité Forestal (COFO), Octubre 2010, Roma, Italia

Por tanto resulta necesario proporcionar a los planificadores un conocimiento más profundo sobre la interrelación bosque/agua en el marco de las diferentes iniciativas políticas (por ejemplo la Directiva Marco Europea del Agua, Infraestructuras Verdes y Bosque Europa. Esta necesidad resulta urgente en la región mediterránea permanentemente enfrentada a la escasez de agua – principal factor limitante para la vida y el recurso más estratégico para asegurar la sostenibilidad de la región-. En este contexto EFIMED, la Oficina Regional del Mediterráneo de EFI, ha contribuido y sigue haciéndolo, a mejorar el diálogo ciencia-política en relación al tema crucial del agua, los ecosistemas forestales y la sociedades al concebir y publicar el libro titulado “**Agua para los Bosques y la Sociedad en el Mediterráneo: un difícil equilibrio**”.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha contribuido a esta iniciativa con aportaciones técnicas y apoyo financiero. Al haber jugado un papel decisivo en temas relacionados con los bosques y el agua durante muchos años, la FAO ha desarrollado progresivamente un marco conceptual y operativo que enlaza la hidrología forestal con la gestión de las cuencas, el desarrollo sostenible de las montañas, la gestión del riesgo de desastres, y la mitigación y adaptación al cambio climático. El hecho de que el trabajo de la FAO se centre con intensidad en temas de agua y bosques resulta de gran relevancia para las áreas áridas y semiáridas como la cuenca mediterránea.

Los otros dos socios, CREAM y CTFC (en relación con el proyecto SYLVAMED) también han destinado recursos para apoyar el proyecto de EFIMED, en particular para difundir al máximo el libro entre los lectores de habla no inglesa.

Con el presente volumen, de la serie de EFI “Lo que la ciencia nos puede explicar” , EFIMED pretende facilitar el acceso a los conocimientos más recientes y la experiencia de los expertos internacionales de más alto nivel – basados en contribuciones de cuarenta científicos de renombre – sobre las complejas relaciones, compromisos, y nuevos retos en relación con el trinomio agua-sociedad-bosques.



**Marc Palahi**  
Jefe de EFIMED



**Moujahed Achouri**  
Jefe de Equipo  
Equipo de Conservación de Bosques  
División de Evaluación, Gestión  
y Conservación  
Departamento Forestal de la FAO



**Figura 1.** El lago artificial de La Môle en una cuenca totalmente arbolada dominada por alcornoque, proporciona agua a la ciudad turística de Saint-Tropez, Var, Francia. Fotografía de C. Birot.

## Introducción

**Yves Birot y Carlos Gracia**

**E**l agua es la base de la vida en la Tierra y establece uno de los vínculos básicos entre la biosfera y la atmósfera. Resulta fundamental tanto para los seres humanos como para la naturaleza, como dice M.K. Tolba “hidrata el cuerpo, riega nuestros alimentos, potencia la industria y nutre los ecosistemas terrestres y acuáticos”. El ciclo del agua liga las sociedades humanas a los ecosistemas. El agua constituye uno de los subsistemas de la naturaleza.

La larga historia de la región mediterránea, cuna de civilizaciones, está marcada por la interacción y co-evolución entre el hombre y su entorno natural, y con el desarrollo de la agricultura, incluyendo la agricultura de regadío, la ganadería y la aparición de los hábitats urbanos. Esta evolución todavía continúa aunque bajo formas diferentes. El Norte de la Cuenca Mediterránea ha experimentado, durante milenios, una importante reducción de la cubierta forestal debido a la presión antropogénica, proceso que se está invirtiendo durante las últimas décadas debido al abandono de las áreas rurales y a la creciente urbanización de la sociedad, lo que ha supuesto una recolonización natural de la vegetación. En contraste, los bordes Sur y Este se caracterizan por una enorme presión por parte de las poblaciones humanas sobre los ecosistemas forestales y los montes que conduce al sobrepastoreo y a la degradación biológica. Una situación así se explica por el gran crecimiento de la población, la baja renta per cápita y una importante densidad de población rural. Los cambios en el uso del suelo, tanto en las riberas del Norte como del Sur, han afectado y siguen afectando a los procesos biológicos y biogeoquímicos, incluyendo el ciclo del agua y los recursos hídricos, tanto en calidad como en cantidad.

---

**Los países mediterráneos albergan el 60% de la población mundial que padece escasez de agua con menos de 1.000 m<sup>3</sup>/habitante/año. En el año 2025, los 63 millones de habitantes del mediterráneo sufrirá escasez de agua (con menos de 500 m<sup>3</sup>/habitante/año).**

---

La población mediterránea se enfrenta permanentemente a la escasez de agua debido, por ejemplo, a factores climáticos como las precipitaciones limitadas e irregulares, las típicas precipitaciones intensas en otoño e invierno que provocan escorrentía (y erosión del suelo), una demanda evaporativa muy alta, los nada despreciables factores sociales como los cambios en el uso del suelo (sobre todo la necesidad de más agricultura de regadío) para mantener una demografía creciente, especialmente en las áreas urbanas. El **cambio climático** agrava la situación, y lo seguirá haciendo, puesto que se espera que:

- I) aumente la escasez de agua (menos precipitaciones y escorrentías) y disminuyan los recursos hídricos, e
- II) impacte en la vitalidad, resiliencia e incluso en la supervivencia de árboles y ecosistemas debido al aumento de la aridez y de las situaciones extremas cada vez más frecuentes como olas de calor y sequías, lo que, a su vez, reaviva la cuestión sobre la pérdida de bienes y servicios que los ecosistemas brindan a las sociedades humanas. Por lo tanto, el tema del ciclo y de la reserva de agua se debería considerar de un modo integrado teniendo en cuenta tanto el **agua azul** (el agua líquida que se usa para las necesidades humanas o la que desemboca en los océanos) como el **agua verde** (el vapor de agua que resulta de los procesos de evaporación y transpiración). Muchos retos científicos surgen de este enfoque de los flujos hídricos.

Los bosques, montes, garrigas y maquias no son los únicos componentes del paisaje mediterráneo rural sino que conviven con otros ecosistemas más o menos inducidos por el hombre como los cultivos de regadío o de secano, tierras marginales y ecosistemas acuáticos. Sin embargo los bosques y los montes pueden llegar a cubrir áreas importantes, a menudo en la parte alta de las cuencas hidrográficas, en áreas montañosas, y juegan un papel importantísimo en la protección del suelo. Por lo tanto pueden influenciar el régimen del agua. Las relaciones entre la cubierta boscosa y el agua son complejas y dependen de variables tales como el régimen de flujo bajo o alto, la extracción de agua y la calidad de la misma. Puesto que dependen de tantos parámetros, algunos de los cuales son específicos de cada lugar, los resultados en la literatura científica parecen contradictorios. De hecho, no hay un modelo único. Más aún las relaciones entre bosque y agua se caracterizan por muchas opiniones aceptadas que Hamilton (1985) describió como las cuatro M: Malentendido, Mito, Mala interpretación y Mala información. Está claro que se hace necesario salvar el abismo existente entre la ciencia y la percepción del público.

---

El agua, los bosques y las personas forman los tres vértices de una relación triangular que se debería analizar por pares y como un todo.

---

Muchos de los procesos naturales relacionados con el agua en el paisaje no figuran entre las prioridades de los políticos, ni del público general, que tienden a ver este tema como reservado a los expertos. Es más, los temas del agua se han estudiado casi exclusivamente desde la perspectiva del agua azul. Ha llegado el momento de diseñar políticas innovadoras y estrategias dirigidas a equilibrar el agua para el hombre y la naturaleza, y hacerlo a través de un auténtico enfoque socio-eco-hidroológico basado en una gestión integrada del suelo, el agua y el ecosistema. Para ello hace falta que la comunidad científica haga un esfuerzo mayor, en particular a través de un enfoque unitario entre los hidrólogos ecólogos e ingenieros de montes, para organizar y estructurar el conocimiento de que disponemos de una manera global y para llevar a cabo nuevas investigaciones científicas.

Con este trabajo, EFIMED, La Oficina Regional Mediterránea del Instituto Forestal Europeo, tiene la voluntad de ser el catalizador del diálogo entre Ciencia, Política y Sociedad y presentar ideas y materiales para estimular la reflexión.



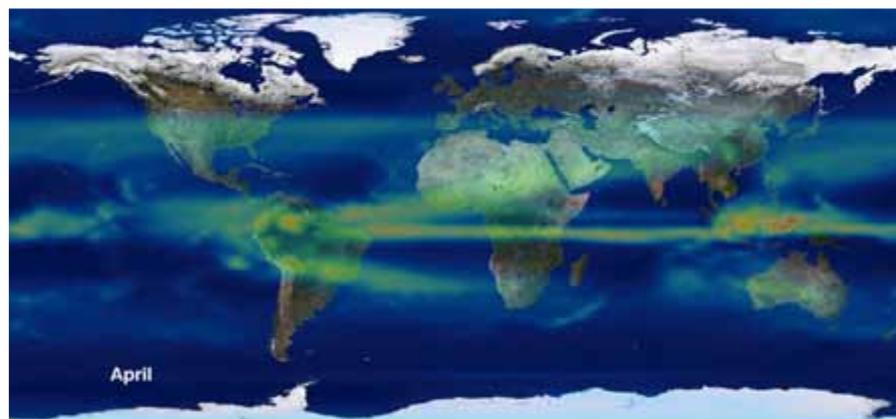
# 1.

## Puntos básicos

**D**urante mucho tiempo se ha considerado el agua, los ecosistemas y las sociedades como sistemas diferentes y de hecho, todavía se consideran así. Sin embargo, es el momento de adoptar un enfoque holístico que integre estos elementos en un único, aunque complejo, sistema hidro-eco-social. Esta complejidad del sistema debería evitar cualquier simplificación excesiva y las opiniones del tipo “blanco o negro”. Más bien debería invitar a una mejor comprensión de la base científica. Este capítulo presenta los conocimientos básicos y se estructura en cinco secciones:

- 1.1 Una visión general del ciclo del agua: el agua verde y el agua azul.
- 1.2 El agua, los recursos forestales y las personas en el área mediterránea.  
Situación actual.
- 1.3 Las áreas forestales ¿influyen sobre el régimen de lluvias?
- 1.4 Flujos de agua en los bosques; y
- 1.5 Papel de los bosques mediterráneos en la conservación del suelo y del agua.

**Figura 2.** Investigación sobre el ciclo hidrológico global: promedio de la precipitación global en el mes de abril desde 1985 hasta 2005. Fuente: NASA.



**Figura 3.** Reforestación en terrazas construidas siguiendo las curvas de nivel tras un incendio forestal. (Allègre-les-Fumades-30- Francia). Foto, C. Birot.



## Una visión general del ciclo hidrológico: Agua verde y agua azul

Yves Birot y Carlos Gracia

---

A escala global, y desde los orígenes de nuestro planeta, una misma masa de agua fluye continuamente siguiendo las rutas que conforman los procesos del ciclo hidrológico. Este ciclo conecta la biosfera con la atmósfera y los ecosistemas, incluyendo los antroposistemas.

---

Como cualquier otro elemento o recurso regulado por ciclos, el agua se concentra en compartimentos entre los que se mueve mediante flujos. La reserva total de agua del sistema Tierra no ha cambiado desde sus orígenes: el agua ni se crea ni se destruye. La reserva total es la suma del agua presente en varios compartimentos: océanos (el más importante, con diferencia), hielo (en regiones polares y alta montaña), la atmósfera, ríos y lagos, el permafrost, la humedad del suelo, el agua subterránea, y el agua que forma parte de los organismos vivos, en particular la vegetación. La reserva de cada uno de estos compartimentos depende de los flujos de agua entrante y saliente.

- i) La lluvia cae sobre la tierra y los océanos (unas tres veces más en estos últimos).
- ii) El agua precipitada es devuelta a los océanos tras discurrir por la superficie e infiltrarse, dando origen a la escorrentía y al flujo de agua en el suelo.
- iii) El agua retorna a la atmósfera a través de la evaporación de los océanos y la condensación, así como por la evaporación y condensación de los océanos de la cubierta vegetal.
- iv) Una parte del vapor de agua se transporta del océano a la tierra; sin embargo, y en contra de lo que normalmente se acepta como válido, este transporte constituye sólo un 10% de la evaporación oceánica total y un tercio de la precipitación sobre la tierra (Figura 4).

El ciclo del agua se impulsa por la energía del sol. Se invierte en él un 25% del total de la energía solar que incide anualmente sobre la tierra.

El viaje del agua en los ecosistemas terrestres empieza con la lluvia, tras la cual sigue unas rutas que pueden divergir en determinados puntos, los llamamos puntos de partición (PP), descritos en la Figura 5. El primer PP lo constituyen las copas de los árboles,

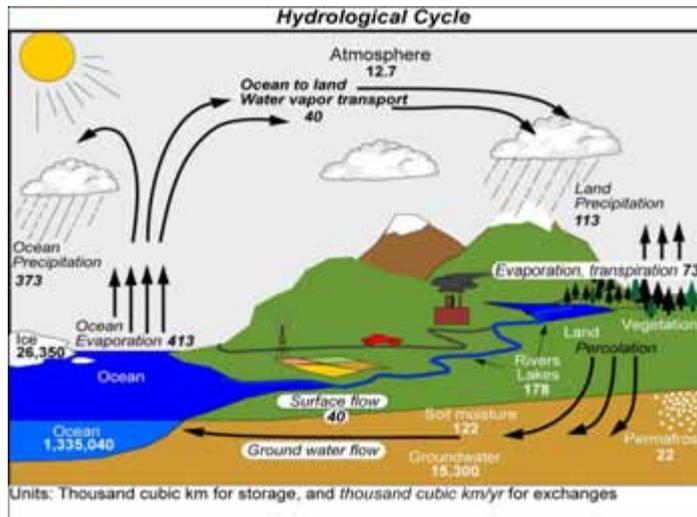


Figura 4. El ciclo hidrológico global: estimaciones de los principales compartimentos de agua (en redondilla) en  $10^3 \text{ km}^3$ /año y el flujo de humedad a través del sistema (en cursiva) en  $10^3 \text{ km}^3$ /año, equivalente en exagramos ( $10^{18} \text{ g}$ ) por año. Fuente: Trenberth *et al.* 2007.

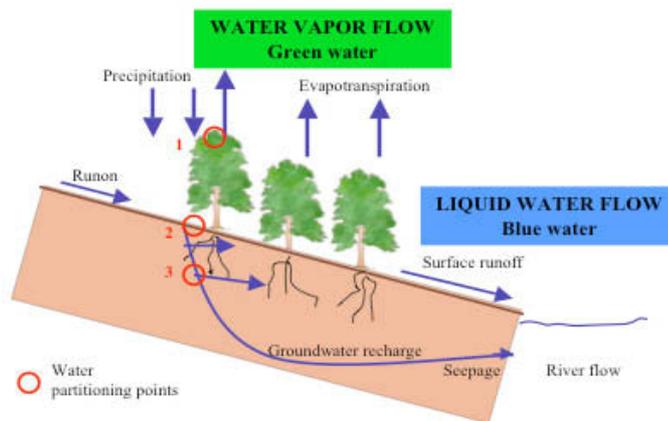


Figura 5. Ciclo hidrológico en un ecosistema mostrando los puntos de partición de la lluvia. Fuente: Falkenmark y Rockström, 2005.

que interceptan parte del agua de lluvia que se re-emite por evaporación directa. En el segundo PP la precipitación se divide en escorrentía superficial y agua infiltrada. En el tercer PP, el agua que llega al suelo es parcialmente evaporada desde el mismo, transpirada por las plantas y una fracción recarga los acuíferos subterráneos.

Evaporación y transpiración constituyen el **flujo verde**, mientras que la escorrentía superficial y la recarga de agua subterránea constituyen el **flujo azul**. La partición de los flujos de agua a lo largo del ciclo hidrológico viene determinada por factores biofísicos (p.ej.: capacidad de retención de agua del suelo, intensidad de las precipitaciones, demanda atmosférica, etc.), biológicos (ruta de la fotosíntesis) y humanos (p.ej.: uso del suelo, gestión de los bosques, compactación del suelo, etc.).

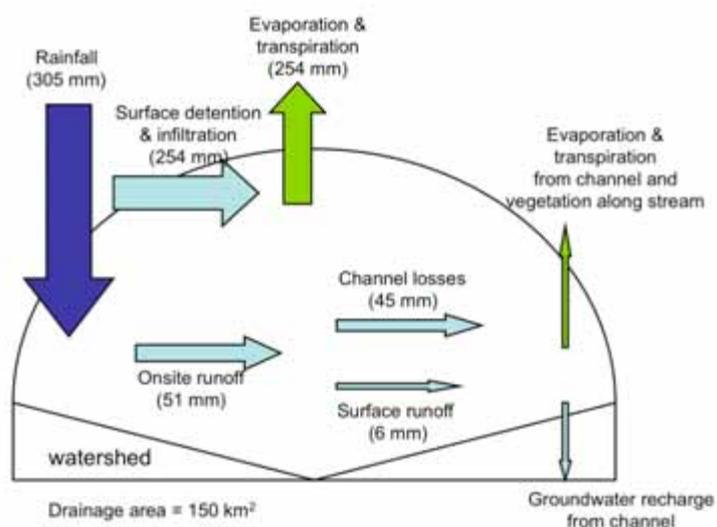
La velocidad a la que se mueve el agua a lo largo de las diferentes rutas entre los compartimentos del ciclo hidrológico puede variar muchísimo. La recarga de agua subterránea puede ser un proceso muy lento mientras que el flujo máximo tras una precipitación fuerte e intensa es casi inmediato. Sin embargo, estudios recientes sobre la composición isotópica del agua muestran que el agua recogida en las partes más bajas de una cuenca hidrológica contiene moléculas procedentes de la lluvia además de otras

**Tabla 1.** Tiempo medio de residencia en diferentes reservas. Fuente: Pidwirny, 2006.

Reservas	Tiempo medio de residencia	Reservas	Tiempo medio de residencia
Antártida	20.000 años	Aguas subterráneas (profundas)	10.000 años
Océanos	3.200 años	Lagos	50–100 años
Glaciares	20–100 años	Ríos	2–6 meses
Cubierta de nieve estacional	2–6 meses	Marismas/ Humedales	5 años
Humedad del suelo	1–2 meses	Agua incorporada a las plantas	Varias horas
Aguas subterráneas (superficiales)	10–200 años		

previamente almacenadas en el suelo. Pueden llegar a ser necesarios varios miles de años para renovar las aguas subterráneas y oceánicas, mientras que una molécula de agua permanece un promedio de sólo ocho días en la atmósfera y tan sólo unas pocas horas en las plantas. La Tabla 1 representa el tiempo de residencia en algunos compartimentos del ciclo del agua.

La gestión de los recursos hídricos a diferentes escalas geográficas debe basarse en el análisis del balance hídrico. Constituye un método contable que requiere evaluar multitud de datos hidrológicos relacionados con las reservas y los flujos de agua (entradas y salidas).



**Figura 6.** Balance hídrico que ilustra la contabilidad del agua en la Cuenca experimental de Walnut Gulch, una cuenca hidrológica de tributarios efímeros en la Gran Cuenca del Río San Pedro, Arizona. Fuente: Renard et al. 1993.

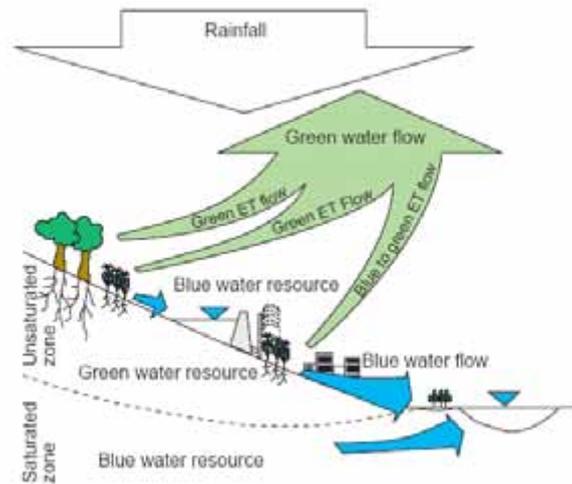


Figura 7. Agua verde y azul. Fuente: Falkenmark y Rockström, 2005.

¿Cómo se calcula la cantidad de agua que se mueve desde la atmósfera, a través de la superficie terrestre, al interior del suelo, a través de las plantas, al océano y de vuelta a la atmósfera mediante la evaporación y la condensación? El método más común es el análisis del balance hídrico, un práctico método de contabilidad que proporciona un buen marco para comprender los procesos hidrológicos. Se puede aplicar a varias escalas, desde el nivel de parcelas, pasando por cuencas hidrológicas tanto pequeñas como grandes (Figura 6), llegando incluso a nivel global. Resulta necesario entender este balance para gestionar de un modo sostenible tanto el recurso mismo como las interconexiones con el ambiente y la sociedad. En su forma más simple un análisis del balance hídrico se basa en una sola ecuación que compara las entradas y salidas de agua al tiempo que da cuenta de los cambios en su almacenamiento.

Un análisis del balance hídrico debe evaluar variables hidrológicas como: la precipitación, interceptación, evaporación, evapotranspiración, infiltración, escorrentía (superficial y subsuperficial), almacenamiento (tanto superficial como subterráneo) y el uso del agua. Sin embargo, estos datos no siempre están disponibles, dificultad que puede suplirse en parte gracias a los modelos de simulación hidrológica (empíricos o mecanicistas) que sean capaces de proyectar variaciones detalladas del balance hídrico a lo largo de varios años. **No obstante, siempre resultan necesarios datos reales provenientes de cuencas hidrológicas monitorizadas a largo plazo.**

La noción de agua verde y azul proporciona un marco conceptual muy valioso para la gestión del agua a diversas escalas. La lluvia en forma de precipitación genera dos tipos de recursos: agua verde en el suelo que se utiliza para el crecimiento de las plantas y para la producción y que retorna a la atmósfera en forma de flujo de vapor; y agua azul en los ríos y acuíferos, accesible para el hombre, incluyendo el regadío (mediante el cual el agua azul se transforma en agua verde). Este marco (Figura 7) brinda un enfoque muy interesante de varios puntos del análisis tales como:

- Unificación de la protección ecológica y los procesos hidrológicos
- Producción de alimentos a través de la agricultura de secano (alimentada por la lluvia) y/o de regadío
- Integración de la gestión del agua mediante el control de sus movimientos a través del paisaje en relación con el uso del suelo
- Reparto equilibrado del agua entre los seres humanos y la naturaleza
- Comprensión del concepto eco-socio-hidrología

---

El enfoque del agua verde ha despertado gran interés en los últimos años, especialmente en regiones secas donde el agua verde domina el ciclo hidrológico. Sin embargo, resulta claro que el concepto tiene sus límites al tratar de estructurar la información sobre la gestión y la planificación de los recursos hídricos.

---

Estos límites se relacionan con la simplificación del ciclo hidrológico en algunos estudios basados en aguas verdes, las escalas temporales y espaciales adecuadas para la consideración de flujos de baja intensidad, la incertidumbre asociada al almacenamiento de agua en el perfil del suelo, y la generación de flujos de agua en las zonas saturada e insaturada del suelo. Por estas razones debería prestarse más atención a las conexiones hidrológicas entre los flujos del agua verde y azul y su representación en la gestión de los recursos hídricos más que enfocar el problema en los propios flujos.

### Lecturas recomendadas

- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2005. Balancing water for humans and nature; the new approach in Ecohydrology. Earthscan. 247 p.
- Jewitt, G. 2006. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning. *Physics and Chemistry of the Earth* 31(15-16): 753-762.
- Pidwirny, M. 2006. The Hydrologic Cycle. *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. Accessed 01/03/2010. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>
- Trenberth, K. E., Smith, L., Qian, T.T., Dai, A.G. and Fasullo, J. 2007. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J. Hydrometeor.* 8:758-769

## 1.2.

# Los recursos hídricos y forestales y la población del Mediterráneo: situación actual

Gaëlle Thivet y Mohammed Blinda

La región Mediterránea, con su clima y la diversidad de sus territorios ubicados en la confluencia de tres continentes, es el hogar de unos 470 millones de habitantes. Es en su herencia natural y cultural y, por supuesto, en el mar que comparten los países y territorios ribereños, donde los conflictos medioambientales y de desarrollo social se agudizan. En esta eco-región las economías continúan dependiendo en gran medida de los recursos naturales, especialmente en el Sur. La necesidad de satisfacer los requisitos de una población en crecimiento en una región donde el clima es incierto y las crisis energéticas constituyen una amenaza, plantean muchos interrogantes sobre la disponibilidad y renovación de los recursos hidrológicos, la fertilidad del suelo, la supervivencia de los bosques, el equilibrio de los sistemas naturales y el desarrollo social.

El crecimiento demográfico es importante tanto en el Sur como en el Este, especialmente en áreas urbanas y costeras cuyo crecimiento anual es de 4,1 millones de habitantes y soportan un flujo anual de 175 millones de turistas.

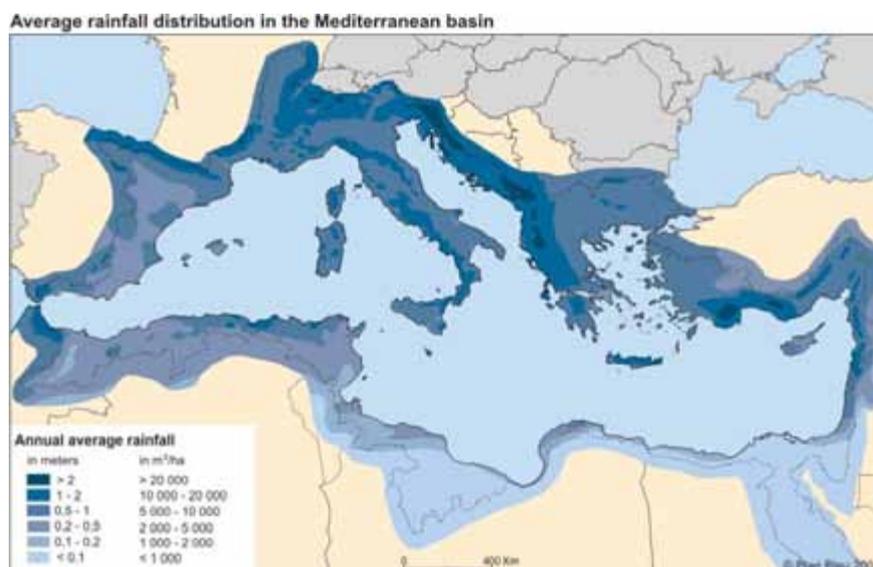


Figura 8. Distribución media de las precipitaciones en la Cuenca Mediterránea. Fuente: Plan Bleu, Margat.

Durante los últimos 40 años el crecimiento de la población en la región Mediterránea ha sido muy importante, aumentando de 280 millones en 1970 a 468 en 2008. Este crecimiento ha resultado especialmente intenso en los países del Sur y del Este del Mediterráneo (SEMC, por sus siglas en inglés)<sup>1</sup> donde se alcanzó un récord histórico de crecimiento anual del 2,21% entre 1970 y 2008, con un aumento de 4,1 millones de habitantes por año. Este crecimiento quintuplica el crecimiento de la población de los países del norte del Mediterráneo durante el mismo período, que crecieron, en promedio, un 0,5% anual.

A pesar de que su población ha sobrepasado a la de los países del norte del Mediterráneo desde 1985, la tasa de fertilidad en los SEMC ha descendido entre un 2 y un 3% anual en los últimos veinte años. Sin embargo, y a pesar de la aceleración de la transición demográfica, se espera que el crecimiento de la población continúe hasta 2025 y más allá (ver capítulo 5.2.). El aumento de la presión demográfica es especialmente intenso en las áreas urbanas y costeras. Un tercio de la población del mediterráneo se concentra en zonas costeras, que representan tan sólo un 13% de la superficie total. En el año 2000, las costas mediterráneas albergaban a 70 millones de habitantes urbanos, más de 580 ciudades costeras y 175 millones de visitantes.

---

La irregularidad espacial y temporal, de las precipitaciones obliga a mantener una capacidad de reserva de agua que representa una elevada proporción del agua superficial. (En Siria representa más del 90% del agua superficial, en Marruecos y Túnez supone más del 80%).

---

Este crecimiento de la población ejerce una presión cada vez más elevada sobre unos recursos hídricos ya de por sí vulnerables debido a las características de irregularidad, escasez y fragilidad del agua en el Mediterráneo. El clima mediterráneo se caracteriza por la distribución irregular de las precipitaciones, tanto en el tiempo como en el espacio (Figura 8).

### Cuadro 1. Hechos y cifras

En 2008 los 22 países y territorios ribereños del Mediterráneo representaban:

- El 5,7% de la superficie mundial de tierras emergidas, incluyendo muchos desiertos y cadenas montañosas.
- El 7% de la población mundial (proporción estable) con aproximadamente 468 millones de habitantes.
- El 31% del turismo internacional con 175 millones de visitantes.
- El 3% de las reservas globales de agua.
- El 60% de la población mundial que vive en “países con escasez de agua”.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Incluyendo todos los países ribereños desde Marruecos hasta Turquía.

<sup>2</sup> Los países donde los recursos hidrológicos renovables naturales per cápita (aunque no todos explotables) ascienden a 1.000 m<sup>3</sup>/per cápita/año.

**Tabla 2.** Recursos de agua naturales renovables en la región Mediterránea. Fuente: Plan Bleu, 2007.

		Sub-regiones (países individuales)			Total
		Norte (Europa)	Este (Oriente Próximo)	Sur (Norte de África)	
Recursos naturales renovables (agua azul) (promedio anual) (a)	Total (km <sup>3</sup> /año)	740	247	95	1.083
	Total (%)	68	23	9	100
	Per cápita (m <sup>3</sup> /año)	3.915	2.371	631	2.441
Índice de Competencia	Habitantes/hm <sup>3</sup> /año	255	422	1.584	410
Recursos renovables explotables (promedio anual) (b)	Total (km <sup>3</sup> /año)	359	133	81	572
	Total (%)	63	23	14	100
	Per cápita (m <sup>3</sup> /año)	1.899	1.279	536	1.289
Estimación de agua verde (promedio anual) (c)	Total (km <sup>3</sup> /año)	300	100	70	470
	Total (%)	64	21	15	100

(a) Recursos internos y externos calculados por sub-región, excluyendo doble contabilidad debida a los intercambios fluviales entre países ribereños.

(b) Según criterios de cada país.

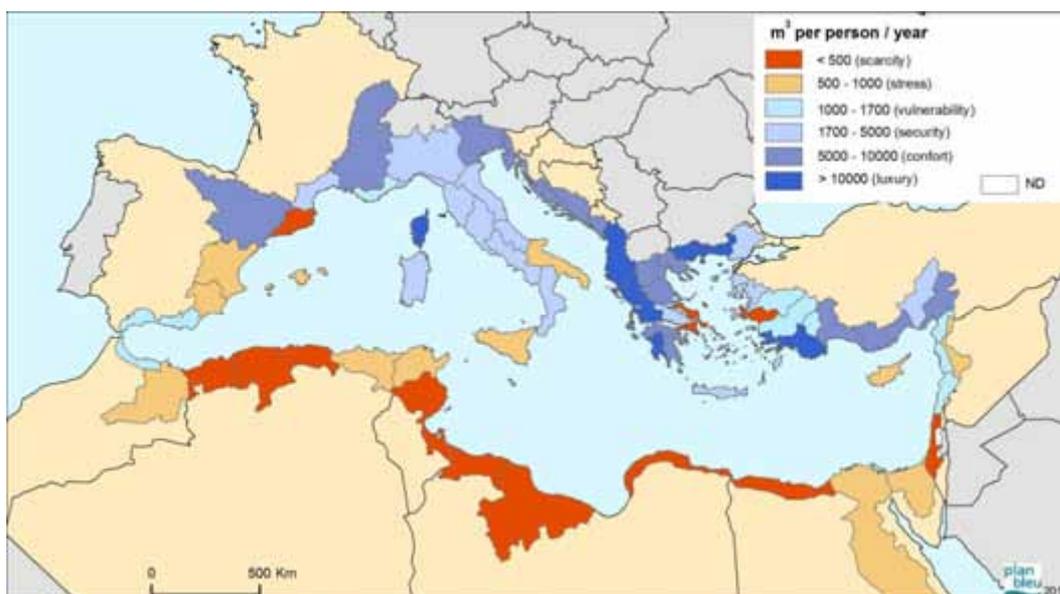
(c) Agua de lluvia utilizada y consumida (evapotranspiración) para regar campos y pastos.

Las estimaciones muestran que la escasa cantidad de recursos renovables de agua dulce tanto subterránea como superficial en todo el Mediterráneo suponen aproximadamente 1.080 km<sup>3</sup>/año, con casi dos tercios concentrados en los países del norte. Los países del Este y del Sur, respectivamente, disfrutan de una cuarta y una décima parte de estos recursos, mientras que sólo un 1% de la cantidad total está disponible para los seis países y territorios menos dotados (Chipre, Israel, Libia, Malta, Territorios Palestinos y Túnez). Es más, el 16% de estos recursos cruzan fronteras y, por lo tanto se comparten entre varios países, tanto si son del Mediterráneo como si no lo son. El grado de dependencia de recursos externos resulta particularmente elevado en Egipto (98%), Israel (59%), Croacia (47%), y Siria (43%).

A esta heterogeneidad de los recursos hidrológicos en el espacio se añade la irregularidad en el tiempo, tanto intra- como interanual. La irregularidad intra-anual se caracteriza por unas precipitaciones concentradas en unos pocos meses (de 50 a 100 días por año, de promedio) y por sequías de verano que tienen lugar durante el pico máximo de demanda (irrigación, turismo). La variabilidad inter-anual se caracteriza por frecuentes déficits de debidos a precipitaciones ineficientes en invierno y primavera, con consecuencias básicamente hidrológicas y/o sequías de verano agravadas (en magnitud y duración) con efectos inmediatos en el suelo y la cubierta y de consecuencias hidrológicas variables.

Tales irregularidades constriñen considerablemente el uso de las aguas superficiales y ha justificado la construcción de infraestructuras de almacenaje, más favorables a la regulación intra e inter anual de las reservas. Por tanto, la proporción de regulación del agua superficial es alta en algunos países: 90% en Siria, 80% en Marruecos y Túnez, 70% en Chipre y 40% en Israel.

En consecuencia, los recursos no se restringen al “agua azul” de flujos superficiales y subterráneos, sino que también debe incluirse el “agua verde”, el agua de lluvia. En los países del Mediterráneo el promedio anual de flujo de agua verde se encuentra entre 400 y 500 km<sup>3</sup>, pero desigualmente distribuido: el 65% en el norte; 20% en el este y 15% en el sur (Tabla 2), lo que explica la elevada demanda de agua para irrigación en todos los países del sur y el este.



**Figura 9.** Recursos hídricos naturales renovables (internos y externos) per cápita en cuencas (1995–2008). Fuente: Estimaciones del Plan Bleu a partir de las fuentes de cada nación.

Los impactos regionales del cambio climático global sobre el ciclo del agua— a pesar de que aún son difíciles de cuantificar— probablemente reducirán los recursos hidrológicos de los países del Mediterráneo, agravarán la variabilidad y, por lo tanto, pondrán en peligro su explotación, impactando mayoritariamente en los países pobres en recursos hídricos. Recientemente varios países sureños han disminuido los recursos hidrológicos asignados a sus planes de desarrollo, ya sea como una medida anticipatoria ya sea como consecuencia de los numerosos años secos de la década pasada que han disminuido los promedios anuales en un 20% en Argelia y en un 25% en Marruecos.

La cuantía del promedio de agua “natural” per cápita es el primer indicador que sirve para caracterizar situaciones de “tensión” o “escasez de agua” (entre 500 y 1.000 m<sup>3</sup> anuales per cápita) y “déficit estructural” (menos de 500 m<sup>3</sup> per cápita/año). Así mismo ilustra las diferencias entre países o regiones internas o entre cuencas (Figura 9).

---

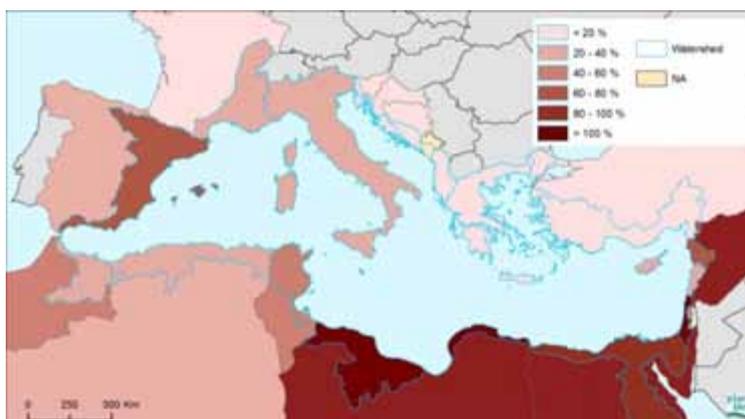
En 2005, casi 180 millones de habitantes del Mediterráneo padecían déficit de agua y 60 millones se enfrentaban a situaciones de escasez.

---

La demanda de agua aumenta drásticamente en el sur y en el este y se satisface cada vez más a través de una producción insostenible.

---

**La demanda de agua**, es decir, la extracción de cantidades que se cifran en el 95% del consumo total y los procesos no convencionales de producción (desalinización, reutilización de aguas residuales regeneradas), incluyendo las pérdidas durante el transporte y el consumo (estimadas en casi el 40% del total de la demanda de agua), **se ha doblado en la segunda mitad del siglo XX hasta alcanzar 280 km<sup>3</sup>/año para todos los países ribereños en 2007. La agricultura es el principal consumidor (180 km<sup>3</sup> /año para re-**



**Figura 10.** Índices de explotación de los recursos hídricos renovables en países individuales y por cuencas (2005). Fuente: Plan Bleu.

Note. Indices close to or higher than 80% indicate already high tensions on water resources; ratios between 60% and 80% are signs of a high risk of medium-term structural tensions; ratios between 20% and 60% point to local or conjectural tension.

gar 26 millones de hectáreas) lo que representa el 64% de la demanda hidrológica total: 45% en el Norte, y 82% en el sur y el este, manteniéndose marginal sólo en los países del este del Adriático.

A escala Mediterránea, la presión de la demanda sobre los recursos, expresada por el índice de explotación de recursos naturales renovables<sup>3</sup>, revela grandes contrastes geográficos (Figura 10).

Actualmente, en países como Egipto, Israel, Libia, Malta y Siria, así como en la franja de Gaza, el consumo se acerca, y en algunos casos excede, los límites de disponibilidad de los recursos renovables. La situación es incluso más alarmante cuando el índice se calcula, no a escala de países individuales sino a escala la cuenca mediterránea. La presión sobre los recursos resulta ser más intensa cuando sólo se tienen en cuenta los recursos hidrológicos “explotables” ya que representan aproximadamente la mitad o un tercio de los recursos hidrológicos naturales renovables.

Una parte cada vez mayor de la demanda se satisface produciendo agua de un modo insostenible, que se estima en 16 km<sup>3</sup>/año, de los cuales el 66% proviene de la extracción de agua fósil y un 34% de la sobreexplotación de los recursos renovables. El índice de producción insostenible de agua<sup>4</sup> es especialmente alto en Libia (86%), la Franja de Gaza (40%), Túnez (29%), Argelia (29%) y España (25%).

Además, la tensión sobre los recursos hidrológicos naturales supone más degradación y polución como consecuencia de las actividades humanas, lo que modifica el régimen hidrológico o su calidad limitando las posibilidades de uso. Como resultado, se agrava la vulnerabilidad del aprovisionamiento debido al aumento del coste (en particular, el coste del tratamiento del agua), riesgos para la salud pública y conflictos entre consumidores, regiones o países.

---

**Las políticas hidrológicas están todavía demasiado enfocadas en el suministro, lo que induce riesgos a largo plazo.**

---

<sup>3</sup> Definición del índice de explotación: volumen de extracción anual de los recursos hidrológicos naturales renovables/ volumen medio anual disponible de recursos hidrológicos naturales renovables, expresado en porcentaje.

<sup>4</sup> Correspondiente al volumen total de de extracción de agua de acuíferos no renovables y sobreexplotación de capas freáticas expresadas como el porcentaje del volumen total de extracciones.

Para satisfacer la creciente demanda hidrológica las estrategias nacionales continúan enfocándose en aumentar el suministro de agua, construyendo infraestructuras hidrológicas a gran escala, desarrollando trasvases inter regionales e internacionales, “extra-riendo” aguas subterráneas no renovables (en las cuencas saharianas), o usando recursos tan poco convencionales como la reutilización de aguas residuales tratadas (España, Israel, Chipre, Egipto, Túnez), aguas de drenaje agrícola (Egipto), o desalinización de agua marina y salobre (en aumento en Malta, España, Argelia e Israel).

La búsqueda de enfoques centrados en un creciente suministro y extracción, explotación y mayor deterioro de los recursos naturales puede inducir riesgos a largo plazo, especialmente: reducción rápida de los recursos fósiles, destrucción de acuíferos costeros debido a la intrusión del agua de mar, degradación del agua y de la calidad de los ecosistemas acuáticos, reducción de la escorrentía y regresión de los humedales. Las políticas orientadas hacia el suministro están alcanzando sus límites físicos, socio económicos y medioambientales, como queda patente por el estado de muchos embalses en países del Sur y el Este donde la acumulación de sedimentos ha reducido considerablemente su capacidad de almacenamiento.

A pesar de algunos rasgos comunes, la dinámica de los bosques y montes muestran variaciones regionales. En ambas riberas los bosques están a menudo situados en áreas montañosas, actuando como “torres de agua” y principales refugios de biodiversidad, por lo que las interacciones entre bosques y agua que tienen lugar en las partes altas de las cuencas resultan cruciales.



En el Norte, los bosques actualmente cubren casi 50 millones de hectáreas, incluyendo de 20 a 25 millones de hectáreas de bosque típicamente mediterráneo, a las que se añaden 20 millones de hectáreas de otros montes (maquis, garrigas, matorrales). Al Sur y al Este los bosques ocupan unos 13 millones de hectáreas y otros bosques unos 15 millones, más de dos tercios de los cuales se localizan en Turquía.

**Figura 11.** Cambios en las superficies de los bosques desde 1990–2007 (1.000 ha). Fuente: FAO.

Durante siglos las actividades humanas como la explotación de madera y el pastoreo y las prácticas de aclareo han sometido a los ecosistemas del Mediterráneo<sup>5</sup> a una gran presión. La intensidad de estas prácticas a veces ha excedido la capacidad natural de renovación de los bosques, con el resultado de la degradación de la cubierta del suelo, erosión e incluso desertificación. En períodos de menor presión, la capacidad de recuperación de los ecosistemas del Mediterráneo ha dado lugar a una regeneración natural más o menos rápida puesto que los bosques reaparecían sobre el suelo previamente cultivado o usado para el pastoreo.

La situación actual en ambas riberas es de grandes contrastes (Figura 11). En el Norte, tras el uso excesivo de los siglos XVIII y XIX, y la regresión que siguió, el proceso de regeneración de los bosques se observa prácticamente en todas partes, debido al gradual abandono de las prácticas agrícolas y ganaderas en la mayoría de las superficies marginales que son menos aprovechables debido a las mayores condiciones del mercado agrícola. El aumento de las superficies forestales se ha visto incrementado, además, por las iniciativas de reforestación.

Lamentablemente, la presión por el uso excesivo todavía es muy grande en el Sur donde las áreas marginales se deforestan para el cultivo, sobrepastoreo u obtención de leñas. Mientras las poblaciones de los macizos montañosos caen presa de la degradación, la superficie de los bosques naturales experimenta un retroceso; y a pesar de que muchos bosques de elevada altitud se están convirtiendo en bosques bajos como maquis o garrigas, o presentan claros cada vez mayores, todavía aparecen bajo la clasificación estadística de “bosques”. Sin embargo, durante los últimos años, se ha observado algún progreso gracias a los esfuerzos por reforestar. La situación se mantiene intermedia en los países al Este del Mediterráneo.

---

**Las demandas de la sociedad hacia los bosques han evolucionado hacia una multifuncionalidad creciente que va desde la producción de madera hasta el uso social y la preocupación medioambiental.**

---

En las sociedades rurales del Mediterráneo los bosques y pastos han sido siempre cruciales para las economías locales y regionales, proveyendo de leña, madera para la construcción tanto en tierra como de barcos, productos para la caza y cosecha, además de constituir recursos vitales para el pastoreo. La situación ha cambiado en la mayor parte del Norte, pero esos bienes aún juegan un papel esencial en el Sur, especialmente la leña y los pastos. Sin embargo, y debido al lento crecimiento, la producción heterogénea y las dificultades para la explotación, la moderna industria maderera rara vez muestra interés en los bosques del Mediterráneo.

Con la era industrial y urbana han aparecido nuevas prácticas— los bosques se destinan al recreo y el ocio, como el ecoturismo y los deportes al aire libre, tanto por los residentes como por los turistas. Estos servicios y actividades medioambientales que, normalmente, no están en manos del mercado, a menudo prevalecen en el Norte y su popularidad empieza a crecer en el sur, a pesar de que las actividades extractivas continúan siendo predominantes.

A pesar de que la función protectora de estos ecosistemas se conoce desde hace mucho tiempo, el enfoque actual en el desarrollo sostenible enfatiza su valor capital como

---

<sup>5</sup> Los ecosistemas terrestres naturales y seminaturales del Mediterráneo que se han considerado aquí se componen de bosques (territorios donde el dosel de árboles grandes supera el 10%), otros montes (matorrales, maquis estepas) y pastos naturales. No se incluyen las áreas de agricultura intensiva o ecosistemas acuáticos. Mientras que las estadísticas nacionales brindan una información muy útil sobre los cambios en bosques, el conocimiento sobre otros bosques y sus pastos es mucho menos específico.

productores de bienes públicos locales y globales, en la protección del suelo y el agua, en la lucha contra la erosión y desertización, en la absorción de gases de efecto invernadero, y en la conservación de la biodiversidad de flora y fauna. Este último punto es el más importante al ser la región Mediterránea uno de los puntos calientes (“hot spots”) de la biodiversidad mundial.

Los métodos tradicionales de gestión forestal -cuando respetan la conservación del suelo y la regeneración del bosque- son ideales para la producción de leña. Sin embargo, los nuevos usos sociales y la preocupación actual por la preservación de la biodiversidad y la lucha contra el cambio climático global requieren importantes innovaciones en el campo de la gestión forestal.

---

### El futuro de los bosques del Mediterráneo está amenazado por el riesgo, cada vez mayor, de incendios devastadores inducidos por la sequía.

---

Los incendios forestales son frecuentes durante el verano, destruyendo grandes áreas: casi 600.000 hectáreas fueron destruidas por el fuego en el 2007 sólo en los países al norte del Mediterráneo. El número de incendios crece lentamente en el norte, pero el principal problema tiene que ver con los grandes fuegos que contabilizan la mayor parte del daño en términos de área y coste. Las políticas se han enfocado excesivamente en evitar el fuego en lugar de gestionarlo, lo que ha dado como resultado una acumulación de combustible. El abandono rural también ha llevado a una invasión de vegetación sobre áreas extensas y uniformes contribuyendo así a un, ya de por sí, elevado riesgo de incendio. Otra consecuencia de la acumulación de biomasa es el mayor consumo de agua: fuente de una creciente competencia entre bosques, ciudades y riego. En los países sureños y occidentales los incendios son menos destructivos (61.000 hectáreas en 2005), pero hay nuevos brotes en el este, con casi 80.000 hectáreas quemadas en 2007 (Chipre, Eslovenia, Croacia y Turquía). A pesar de que los montes usados para pastos son menos propensos a quemarse, pues los pastos protegen contra el acumulación de biomasa reduciendo así el riesgo de incendio, el aumento de estas superficies de pastoreo podría incrementar el riesgo. Es más, el cambio climático podría aumentar considerablemente el riesgo de incendio debido a estaciones secas más largas, tanto en el Norte como en el Sur.

---

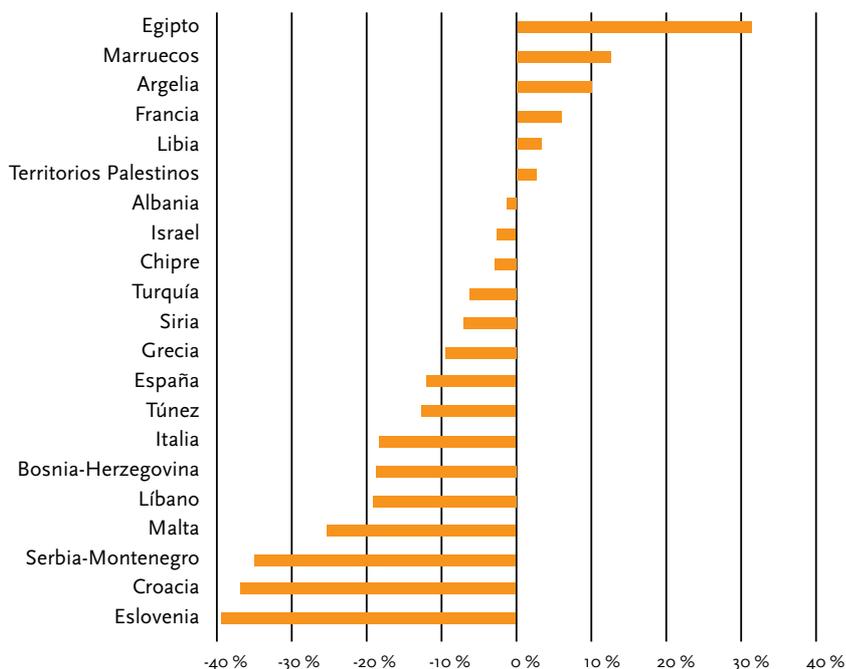
### Los suelos mediterráneos están sujetos a procesos de desertificación lentos, pero inevitables como consecuencia de la degradación del suelo debida a una gestión inadecuada de los regadíos, especialmente al sur y al este del Mediterráneo.

---

Las valoraciones sobre la amplitud y el grado de irreversibilidad de la desertificación<sup>6</sup> a menudo son contradictorias y muy controvertidas. Sin embargo, la gravedad del fenó-

---

<sup>6</sup> “Desertificación” entendida como “la degradación del suelo en zonas áridas, semi áridas y sub húmedas debido a varios factores, entre los que se incluye variaciones climáticas y actividades humanas”. La desertificación es, por lo tanto, un proceso que conduce a la pérdida gradual de la productividad del suelo y a la reducción de su cubierta, atribuibles básicamente a la actividad humana en las zonas secas. Debido a la menor cubierta, los suelos son más sensibles a la erosión del agua y el viento, lo que conduce a su destrucción gradual. Las consecuencias de este proceso son reducción de la fertilidad y ciclos de agua degradados, lo que tiene efectos devastadores sobre la vegetación y la producción.



**Figura 12.** Pérdidas netas de suelos cultivables entre 1980 y 2005 (%). Fuente: FAO, Cálculos del Plan Bleu.

meno se reconoce hoy ampliamente en la región. Según estimaciones efectuadas a principios de los 90, el 80% de las zonas áridas, semiáridas o secas se ven afectadas por la desertificación al sur y al este del Mediterráneo. En tales zonas el impacto es mayor sobre los pastos y suelos cultivables de secano, así como sobre los de regadío debido principalmente a la salinización. La desertificación también afecta a casi dos tercios de los suelos áridos o secos de la Europa Mediterránea (España, Grecia e Italia).

A pesar de que los datos nacionales sobre la degradación del suelo continúan siendo fragmentarios y relativamente poco fiables, confirman la seriedad y amplitud del fenómeno causado en parte por la erosión del viento y el agua. Las causas principales de la degradación del suelo son: la deforestación, las prácticas agrícolas intensivas, el sobrepastoreo, el uso excesivo de la biomasa, las actividades industriales y las obras públicas.

La Figura 12 muestra que en la mayoría de países del Mediterráneo, los suelos cultivables han ido disminuyendo a lo largo de los últimos 20 años debido a la erosión, la pérdida de fertilidad y la expansión urbana descontrolada. Los valores expresados son netos y, por ello, enmascaran los fenómenos contrarios. En el caso de Egipto, el aspecto globalmente positivo enmascara las superficies afectadas por el desierto por un lado, y la pérdida de los llamados suelos antiguos debido a la expansión urbana descontrolada, desertificación y salinización, por el otro lado. En el Mediterráneo, la superficie de suelo cultivable per cápita se ha visto reducida al 50% en 40 años.

El papel del suelo es fundamental para regular la escorrentía, proteger la biodiversidad, estructurar el paisaje y fijar CO<sub>2</sub>. La calidad del suelo y muchos aspectos medioambientales dependen del cómo se utilice el suelo. En Italia, por ejemplo, la reducción gradual de la superficie cultivada total en los últimos años (-16,5% de 1982 a 2003) ha sido limitada esencialmente a praderas y pastos (-26%). Cerca de los centros urbanos (particularmente en las llanuras, zonas costeras y valles), la agricultura está sometida a gran-

des presiones urbanísticas y ha llevado a reemplazar los suelos más fértiles en beneficio de usos no agrícolas, que resulta en consecuencias negativas y, a menudo, irreversibles.

En muchas regiones agrícolas, especialmente áreas costeras y llanuras donde la agricultura está especializada, el riesgo de polución y contaminación del suelo es mucho mayor. Las cantidades excesivas de fósforo liberadas por fertilizantes orgánicos y minerales son las responsables de la alteración del equilibrio estructural y orgánico de los suelos.

El riesgo de erosión por el agua y por la reducción de materia orgánica presente en los suelos es mayor en áreas montañosas, a excepción de las forestales. En Italia, la pérdida media de suelo se estima en más de tres toneladas por hectárea/año y puede, en algunos casos, como en las regiones sureñas, ser aún más significativa y grave. Por último, el riesgo de erosión inducida por el agua y los incendios ha aumentado debido al abandono de las actividades forestales y de pastoreo, y a una gestión forestal insostenible.

---

**Resulta necesario poner en marcha políticas más energéticas y prácticas de gestión sostenible de los recursos hidrológicos, forestales y de preservación del suelo.**

---

Las regiones del Mediterráneo son muy vulnerables debido a desventajas tales como sus particulares paisajes y clima, y sus limitados recursos hidrológicos y del suelo que están repartidos de modo poco uniforme a lo largo de la Cuenca. Las múltiples civilizaciones del Mediterráneo han trabajado implacablemente para dominar sus recursos y conquistar su tierra. Hoy, ambas riberas encuentran dificultades para el mantenimiento cuantitativo y cualitativo o la renovación de estos recursos naturales a la par del crecimiento de la población, a pesar de las medidas implementadas para optimizar estas prácticas y limitar su impacto sobre el medioambiente. El crecimiento poblacional y los esperados impactos del cambio climático necesitarán políticas más energéticas y prácticas de gestión sostenible para los recursos hidrológicos, forestales y para la preservación del suelo.

### Lecturas recomendadas

- Benoit, G. and Comeau, A. 2005. A sustainable future for the Mediterranean: the Blue Plan's environment and development outlook. London, Earthscan Publishers. [www.planbleu.org](http://www.planbleu.org)
- Blinda, M. and Thivet, G. 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée, situation et perspectives. In: Science et changements planétaires Sécheresse vol. 20(1). Montrouge, John Libbey Eurotext. [http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro\\_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml](http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml)
- Hervieu, B. and Thibault, H.L. 2009. Méditerranée 2009: Rethinking rural development in the Mediterranean. Paris, Presses de Sciences Po; CIHEAM.
- Thibault, H.L. 2009. State of the Environment and Development in the Mediterranean. Athens, UNEP-MAP-Plan Bleu. [www.planbleu.org](http://www.planbleu.org)

## Las áreas forestales ¿influyen sobre el régimen de lluvias?

Giorgio Matteucci, Jerry Vanclay y Javier Martin-Vide

Desde la escala local a la escala de paisaje, es un hecho establecido que el papel de los bosques tiene efectos sobre las condiciones microclimáticas, regulando los flujos y la disponibilidad de agua río abajo y previniendo la erosión. Si se tienen en cuenta las precipitaciones, las personas que viven en áreas de con extensas cubiertas forestales creen que los bosques tienen efecto sobre el régimen de lluvia local. A escala global, la precipitación anual sobre el suelo es de unos  $110.000 \text{ km}^3$ , ó  $110 \times 10^{15} \text{ kgH}_2\text{O}$ , mientras que los procesos de evaporación y transpiración generan unos  $70 \times 10^{15} \text{ kg}$  de agua. Las plantas terrestres añaden anualmente  $32 \times 10^{15} \text{ kg}$  de vapor de agua a la atmósfera, aproximadamente dos veces el contenido estimado de agua en la atmósfera. El enorme flujo global de vapor de agua pasa a través de los poros microscópicos que se localizan en la superficie de las hojas (estomas) y representa un servicio ecosistémico fundamental, contribuyendo al ciclo global del agua y a la regulación del clima gracias a la formación de nubes (ver secciones 1.1, 1.4, 3.1).

Por lo tanto, los bosques sostienen el ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración, que enfría el clima realimentando las nubes y la precipitación; los modelos de simulación a gran escala demuestran la regulación biogeofísica del clima por parte de la vegetación a través del albedo (reflectividad), flujos turbulentos y otros efectos sobre el ciclo hidrológico.

---

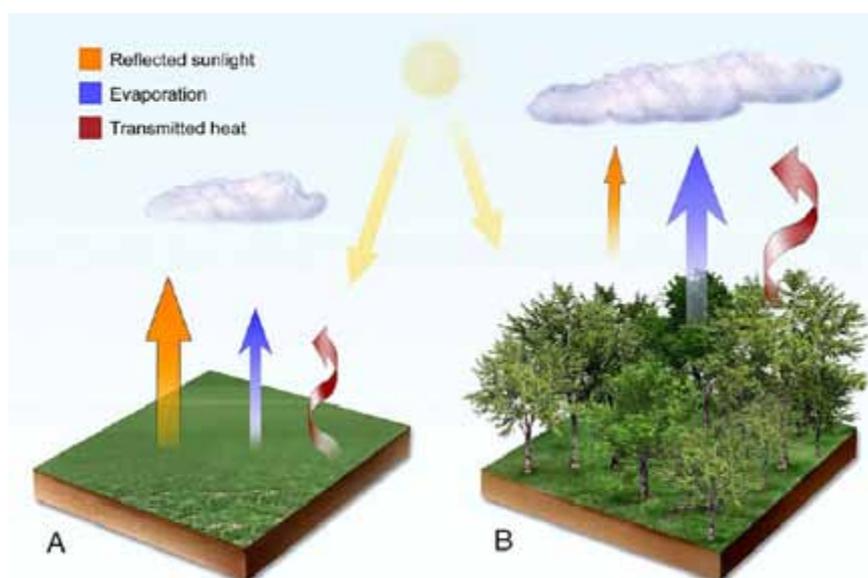
La deforestación tropical a gran escala tiene efectos sobre la lluvia y puede hacer que el clima sea más cálido y más seco.

---

Al considerar cómo afecta el papel de los bosques a los regímenes de lluvia, el reciclado del agua por transpiración es un proceso crucial, si no el más importante. En el Amazonas, aproximadamente un 25–30% de la lluvia está relacionada con el reciclado de la precipitación. A este respecto, estudios basados tanto en observaciones como en la aplicación de modelos indican que la deforestación tropical, el cambio en la evapotranspiración, el albedo y la rugosidad aerodinámica (que favorece los movimientos turbulentos del aire) tienen un efecto sobre las precipitaciones, aunque a diferentes escalas, mientras que las conversiones a gran escala de bosques a pastos crean un clima más cálido y seco. Sin embargo, las interacciones bosque-atmósfera son complejas: la deforestación a pequeña escala produce como resultado una cubierta forestal heterogénea pudiendo llegar a generar un patrón de circulación a mesoescala que refuerce las nubes convectivas y la precipitación.

Los bosques nubosos de montaña capturan el agua del aire o de las nubes arrastradas por la convectividad.

Los bosques nubosos de montaña constituyen un tipo de ecosistema en el que el papel activo del bosque en el ciclo hidrológico resulta más prominente. Además de las lluvias normales, estos bosques condensan agua directamente del viento o de las nubes arrastradas por la convectividad. Estos ecosistemas son comunes en las cordilleras montañosas del interior, especial, pero no exclusivamente, en los trópicos. Por ejemplo, los bosques montanos también están presentes en las cordilleras costeras de algunos países del Mediterráneo y en pequeñas islas oceánicas. La intercepción del agua de las nubes y de la niebla aumenta significativamente la disponibilidad de agua para el bosque y también aguas abajo. A este respecto, la deforestación de los bosques de montaña puede afectar gravemente al ciclo hidrológico de los paisajes circundantes, puesto que los otros tipos de vegetación no tienen la estructura adecuada para interceptar la humedad de las nubes y de la niebla. En estas condiciones la reforestación de las cimas y laderas de la montaña pueden restablecer este ciclo hidrológico tan peculiar. Es más, la modelización ha demostrado que la deforestación de las tierras bajas puede causar elevación orográfica de las nubes, llevando a cambios en la intercepción del agua de nubes por parte de la vegetación montana.



**Figura 13.** “Ejemplos de diversos factores biofísicos en un prado o cultivo (A) y un bosque (B). Debido a la mayor reflectividad del prado o cultivo (albedo) normalmente reflejan más radiación solar que los bosques, enfriando la temperatura del aire superficial relativamente más. En contraste, los bosques a menudo evaporan más agua y transmiten más calor a la atmósfera (calor latente y sensible, respectivamente) enfriándolo localmente en comparación con el prado o cultivo no irrigado. Más vapor de agua en la atmósfera puede conducir a una mayor abundancia de nubes así como a un aumento de la lluvia convectiva. Además, el bosque tiene un dosel más irregular (rugosidad de la superficie) que aumenta la mezcla y ascenso del aire. Fuente: Jackson et al.

---

La acumulación de evidencias, tanto por medio de la observación como de estudios con modelos, sugiere que los bosques tienen un efecto sobre el microclima local, a través de los cambios en el albedo, la superficie foliar, la rugosidad del dosel y la evapotranspiración.

---

En climas templados los efectos de la cubierta forestal sobre la lluvia y otros parámetros biofísicos resultan más inciertos. Por ejemplo, en las estaciones templadas, en áreas donde la precipitación convectiva es un proceso común, se supone que la lluvia debería cambiar en respuesta al cambio de la cubierta del suelo puesto que los flujos superficiales tales como la humedad, el calor y la transpiración también cambian. Sin embargo, el efecto sobre las precipitaciones en las estaciones frías está mucho menos claro. Varios resultados de modelos climáticos sugieren que los bosques templados contribuyen al enfriamiento del aire en comparación con prados y cultivos, mientras que otros estudios muestran lo contrario. El enfriamiento local provocado por el bosque viene provocado por un aumento de la evapotranspiración que puede contribuir a un incremento de la lluvia y al enfriamiento de las áreas cercanas. En otras regiones donde la disponibilidad de agua es relativamente escasa, como en el sureste de los EEUU, las plantaciones forestales pueden calentar el clima regional al absorber más luz solar (menos albedo) sin aumentar substancialmente la evapotranspiración (ver sección 2.2).

Los efectos climáticos a largo plazo de las cubiertas del suelo se simularon para los EEUU bajo tres distribuciones de la vegetación en la superficie: condiciones prístinas (1700), deforestación máxima (1910) y condiciones actuales (1990). Los modelizadores encontraron que los cambios en los patrones de uso del suelo y de sus cubiertas pueden conducir a grados variables de enfriamiento/ calentamiento acompañados de cambios significativos en los patrones de precipitación. Sin embargo, en regiones templadas, es difícil detectar la señal de los cambios de uso del suelo sobre las precipitaciones debido a la alta frecuencia natural de los fenómenos meteorológicos (por ejemplo, depresiones frontales) y a los patrones de lluvia, variabilidad de los paisajes regionales, los cambios no lineales de la cubierta forestal y los efectos relacionados con la urbanización, las cargas de polución y la circulación regional.



**Figura 14.** Bomba biótica de humedad atmosférica: los flujos de transpiración regulados por bosques naturales son superiores a los flujos de evaporación oceánica hasta el punto de que los flujos de aire húmedo que llegan del océano a la tierra son lo bastante grandes como para compensar las pérdidas de agua de escorrentía en toda la cuenca del río. Fuente: Sheil y Murdiyarso, 2009.

Los cambios en la cubierta del suelo pueden disparar cambios hidrológicos también a escala local. En el Sahel, una sequía inicial, probablemente debida a cambios en la circulación oceánica y/o del uso del suelo, causó una reducción sustancial de la cubierta del suelo. Como resultado, con una vegetación decreciente, el albedo aumentó y la evapotranspiración disminuyó; también se redujeron el ascenso convectivo y las lluvias monzónicas asociadas. Por lo tanto los ecosistemas con estas retroalimentaciones positivas parecen contribuir a la magnitud y prolongación de la duración de la sequía. La desertificación está ampliamente representada en las regiones áridas del mundo, debido tanto al impacto climático como al cambio del uso del suelo. ¿Hasta qué punto contribuyen estos efectos del hombre al incremento de la sequía? Y por otro lado, ¿puede la reforestación reducir la tendencia a incrementar los largos períodos de sequía? La importancia de la retroalimentación de los ecosistemas sobre el ciclo hidrológico sugiere que hay espacio para opciones de gestión que potencialmente podrían reducir el riesgo de prolongadas sequías (ver sección 5.3)

La conversión de prados o cultivos a bosque conduce a un descenso del albedo y a un aumento del índice *foliar\**, la rugosidad del dosel y la profundidad de las raíces. Los cambios en estos parámetros pueden modificar los flujos de energía cercanos a la superficie, que a su vez, pueden modificar la temperatura y la humedad. A este respecto, los estudios llevados a cabo tanto en campo como mediante la aplicación de modelos concuerdan en que la plantación de bosques en zonas previamente no boscosas y la reforestación generalmente contribuyen a disminuir la temperatura superficial y aumentan la evapotranspiración, mientras que el impacto sobre las precipitaciones no está tan claro, dependiendo de la localización global, la extensión de la plantación y otras características regionales (ver sección 2.2). Por ejemplo, en el Sahel, los ejercicios de modelización indican que la lluvia actual aumenta en un escenario de aforestación / reforestación comparado con la cubierta actual del suelo, debido a cambios en la estructura de la vegetación, en los patrones de humedad y en la evapotranspiración. En Australia suroccidental los cambios en la cubierta del suelo de árboles a prados/cultivos durante los últimos 250 años podrían explicar en parte los descensos en las precipitaciones invernales, y la reforestación intensiva podría promover, a largo plazo, un aumento de las precipitaciones (ver también secciones 2.2 y 5.3). Por otro lado, un ejercicio utilizando conjuntamente un escenario de aforestación y un modelo climático en los EEUU arrojó como resultado que los cambios en las precipitaciones estivales eran marginales y dependían de la localización del lugar.

Varios de los factores que afectan al uso que las plantaciones de árboles hacen del agua se pueden controlar con la gestión y hay un campo de estudio para diseñar y gestionar las plantaciones forestales de manera que aumenten la eficiencia en el uso del agua. El diseño de las plantaciones (bordes, cortafuegos, hileras de árboles, masas mixtas) permite modificar el acoplamiento atmosférico de las plantaciones con efectos importantes en el uso del agua. Es más, la gestión adecuada de los bosques, tanto naturales como plantados, tiene un impacto relevante sobre el agua que puede resultar disponible en la parte baja de las cuencas para usos agrícolas y civiles (ver secciones 4.3 y 4.4).

Esta evidencia, tanto por estudios de observación como a través de modelos sugiere que los bosques afectan a los patrones climáticos locales a través de cambios en el albedo, área foliar, rugosidad de las copas y evapotranspiración.

---

Recientes hallazgos, conocidos como la teoría de la “bomba biótica” activa, sugieren que en áreas con cubierta boscosa natural extensa y continua, la humedad atmosférica se transporta tierra adentro desde el océano a los bosques.

---

¿Es la influencia de los bosques sobre la lluvia un proceso “activo”? Recientemente, al analizar datos sobre vegetación de transectos terrestres del Programa Internacional Geosfera-Biosfera, los investigadores llegaron a la conclusión de que las precipitaciones en las áreas con bosques naturales extensos (como los del Amazonas, la cuenca del río Yenisey en Siberia y el África ecuatorial) no decrecen al aumentar la distancia con el océano. Este hecho no se cumple en las áreas no forestadas y propusieron la existencia de una “bomba biótica” activa que transporta la humedad atmosférica hacia el interior desde el océano, regulada por la cubierta continua de los bosques. Debido a las características descritas anteriormente, los bosques naturales mantienen flujos altos de evapotranspiración, que sustentan el movimiento ascendente del aire sobre los bosques y “aspiran” aire húmedo del océano. Los autores del estudio sugieren que reemplazar la cubierta boscosa natural por otro tipo de cubierta del suelo puede llevar a una importante reducción de la precipitación continental y así, para asegurar la estabilidad a largo plazo del ciclo de agua terrestre, se hace necesaria la recuperación de los bosques naturales, autosostenidos en amplias áreas del continente.

Sin embargo la “fuerza evaporativa” sobre la que se basa la teoría de la “bomba biótica” ha sido criticada por micrometeorólogos e hidrólogos por no estar basada en principios físicos básicos; por otro lado, otros investigadores subrayan la relevancia de la “bomba biótica” al ofrecer nuevas líneas de investigación en ecología del paisaje, hidrología, restauración de bosques, paleoclimas, y transformar, si se valida, nuestra visión de la pérdida forestal, del cambio climático, la hidrología y los servicios medioambientales.

---

Deberíamos mejorar nuestras debilidades e incertidumbres a la hora de entender y modelizar las respuestas climáticas, incluyendo los patrones de precipitación y los cambios de la cubierta del suelo.

---

Ya que la teoría de “los bosques como bomba biótica” no ha recibido suficiente soporte de confirmación hasta la fecha, ¿deberíamos desechar los puntos planteados por los autores de la teoría? ¡No es el caso! Todos los investigadores que trabajan sobre el papel de los bosques y la vegetación sobre el clima están de acuerdo en que se deberían mejorar nuestras debilidades e incertidumbres a la hora de entender y modelizar las respuestas climáticas, incluyendo los patrones de precipitación; en relación con los cambios de la cubierta del suelo. A este respecto, se debe subrayar que todavía no se reconoce de modo general, en las valoraciones climáticas internacionales, que el cambio en el uso del suelo tenga un papel sobre la precipitación, por lo menos no tan significativo como el causado por el efecto radiativo de las emisiones humanas de gases de efecto invernadero, puesto que los bosques pueden modificar el cambio climático que tiene su origen en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero a través del albedo,

la evapotranspiración, el ciclo del carbono y otros procesos (ver secciones 5.1, 5.2, 5.5).

*“Las consecuencias biofísicas del cambio en la cubierta forestal y otros co-efectos pueden resultar importantes a escala regional y pueden, a veces, reducir o incluso eliminar los beneficios del secuestro de carbono. Las interacciones biofísicas deberían, por lo tanto, ser un factor a tener en cuenta en las estrategias de mitigación del clima en, al menos, dos puntos: al diseñar proyectos de secuestro de carbono para conseguir el mayor beneficio climático y al comparar los costes y beneficios del secuestro del carbono con los de otras actividades de mitigación.”* Jackson et al. *Environ. Res. Lett.*, 2008.

### Lecturas recomendadas

- Andréassian, V. 2004. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* 291: 1–27.
- Bonan, G.B. 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320: 1444–1449 DOI: 10.1126/science.1155121
- Hamilton, L.S. (ed.) 2008. Forests and water. FAO Forestry Paper n. 155. Rome, Italy. Pp.1–78.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G. and Li, B.-L. 2009. Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. *Ecological complexity* 6: 302–307.
- Meesters, A.G.C.A., Dolman, A.J. and Bruijnzeel, L.A. 2009. Comment on “Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land” by Makarieva, A.M. and Gorshkov, V.G. 2007. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1013–1033. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13: 1299–1305.
- Pielke R.A., Adegoke J., Beltran-Przekurat A., Hiemstra C.A., Lin J., Nair U.S., Niyogi D. and Nobis T.E. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus* 59B: 587–601.
- Sheil D and Murdiyarso D. 2009. How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. *Bioscience* 59: 341–347.

## Flujos hídricos en los bosques<sup>1</sup>

Jorge S. David, Juan Bellot, Yves Birot y Teresa S. David

Los flujos hídricos que entran y salen de los bosques se pueden observar a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales. A nivel de la cuenca, la escala espacial primaria de entradas y salidas de agua suele ser fácil de identificar y se ajusta a una ecuación muy sencilla de balance de masa de agua.

El balance hídrico de las cuencas forestadas se puede escribir de una manera simplificada como:  $P = E + Q + IF + S$  (Eq. 1) donde  $P$  es la precipitación,  $E$  es evapotranspiración,  $Q$  es la salida de agua de la cuenca en el punto de aforo,  $IF$  es infiltración profunda y  $S$  es la variación en la cantidad de agua almacenada en la cuenca (en el suelo y en el subsuelo). Normalmente, la infiltración profunda ( $IF$ ) representa una magnitud pequeña que resulta muy difícil de evaluar y, en el caso de un sustrato geológico impermeable, su valor es cero (ver Figura 15 y capítulo 2). Asimismo, a escala anual,  $S$  resulta insignificante la mayor parte de las veces, lo que simplifica aún más la ecuación (1) a esta escala temporal.  $P$  representa el flujo de entrada a la cuenca y  $E$  y  $Q$  son los flujos principales de salida. Cuando la lluvia cae en la cuenca, una parte se evapora y es devuelta a la atmósfera y el resto del agua fluye fuera de la cuenca a través de la red de avenamiento. Como muestra la ecuación (1), si la entrada es mayor que la salida, la variación en la reserva resulta ser positiva (recarga); sin embargo si la entrada es menor que la salida la variación en la reserva resulta ser negativa (depleción). La ecuación del balance hídrico (1) se puede aplicar a cualquier escala temporal. Para simplificar nuestro enfoque, el análisis empezará en la escala anual, que es la más simple para proceder posteriormente a analizar escalas más cortas de tiempo que permiten identificar procesos que son difíciles de entender y evaluar a escala anual.

De aquí en adelante los elementos principales de la ecuación del balance hídrico (1) se analizarán más detalladamente.

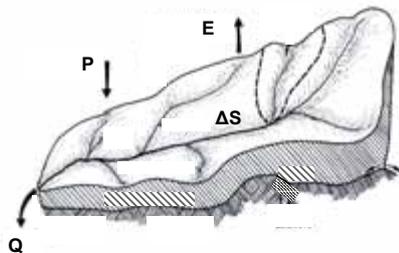


Figura 15. Flujos del balance hídrico a nivel de cuenca considerando una geología impermeable:

$P$  = Lluvia;

$E$  = Evapotranspiración;

$Q$  = caudal ;

$DS$  = Variación en la reserva de agua.

<sup>1</sup> Ver también secciones 1.5, 2.1, 2.2, y 4.1

## Cuadro 2. Definiciones importantes

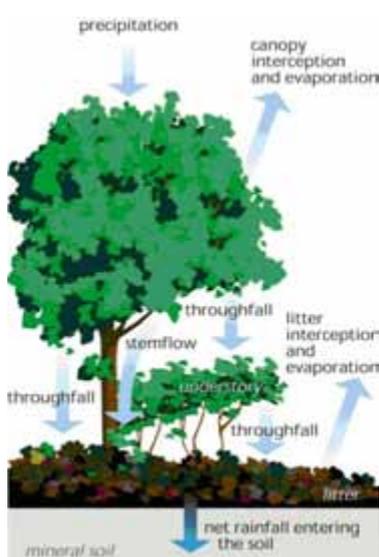
- **Evapotranspiración** de una cuenca forestal es la suma de todos los flujos de evaporación de agua de la superficie de la cuenca. Los flujos de evaporación, a los que nos referimos como **agua verde**, pueden seguir diferentes caminos en su salida de la capa superficial de intercambio, que diferencia los componentes parciales de la evapotranspiración total: **intercepción**, **transpiración** y **evaporación del suelo**.
- **Intercepción** es la evaporación directa de las superficies de los árboles libres de agua retenidas en las hojas durante e inmediatamente después de los episodios de precipitación cuando el dosel está húmedo. En los ecosistemas forestales mediterráneos puede alcanzar hasta un 25% de la evapotranspiración anual.
- **Transpiración** es el camino dominante del flujo de agua verde en los bosques mediterráneos. El agua se capta del suelo o de las aguas subterráneas a través de las raíces, es transportada por la albura de troncos y ramas y, finalmente, es devuelta a la atmósfera a través de los estomas de las hojas (ver Figura 17). En los ecosistemas forestales mediterráneos puede suponer hasta un 75% de la evapotranspiración total.
- **Evaporación del suelo** es la evaporación directa del agua a la atmósfera desde la superficie y las capas superiores del suelo.

La precipitación es, normalmente, el único flujo de entrada a la cuenca. En los climas de tipo mediterráneo la precipitación muestra una alta variabilidad interanual y una fuerte estacionalidad con episodios de alta intensidad en la estación lluviosa.

La lluvia se concentra principalmente en otoño, invierno y al principio de la primavera; el final de la primavera y el verano acostumbran a ser cálidos y secos (sequía estacional estival). La severidad de la sequía estival presenta, sin embargo, una enorme variabilidad interanual que depende de la distribución irregular de los patrones temporales de

la precipitación. Los escenarios de cambio climático proyectan, para la región mediterránea, un incremento en la duración e intensidad de los períodos de sequía.

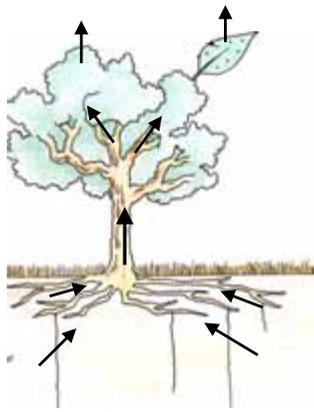
Cuando la lluvia cae sobre una superficie cubierta de vegetación, una parte es interceptada por el dosel y evaporada directamente de vuelta a la atmósfera (pérdida por intercepción, I) y el resto alcanza el suelo, bien a través de huecos, bien goteando desde el dosel (flujo de follaje), bien resbalando por los troncos principales (flujo cortical) (ver Figura 16). La magnitud de la pérdida por evaporación de la intercepción depende de la distribución, duración e intensidad de la lluvia, la capacidad de almacenaje del dosel (normalmente, sobre 2–5 mm) y la velocidad de evaporación desde el dosel húmedo. Una vez que la capacidad de almacenaje del dosel se satura, el agua gotea y cae al suelo. Las lluvias poco intensas y frecuentes humedecen el dosel y aumentan las pérdidas de agua interceptada, en tanto que un régimen de lluvias dominado por precipitaciones concentradas en fuertes tormentas, el dosel se humedece sólo al principio y durante la mayor parte del tiempo que dura la tormenta el agua puede drenar directamente a través del dosel hasta alcanzar el suelo.



**Figura 16.** Mecanismos de intercepción de la lluvia. Fuente: <http://www.fairfaxcounty.gov/nvswcd/newsletter/urbanforest.htm>

Puesto que la intensidad de la radiación es baja durante la lluvia, la tasa de evaporación, en tales condiciones, viene determinada predominantemente por la rugosidad aerodinámica de la superficie (conductancia aerodinámica). Dado que el dosel de los bosques (formados por elementos altos e irregulares) es aerodinámicamente mucho más rugoso que el de la vegetación herbácea, y genera remolinos turbulentos que son cruciales en el transporte vertical del vapor de agua, las tasas de evapotranspiración desde doseles húmedos, bajo condiciones meteorológicas similares, son unas 3–5 veces más altas en los bosques que en la vegetación herbácea.

La transpiración de los bosques mediterráneos puede suponer hasta un 75% de la evapotranspiración total de los mismos, mientras que las pérdidas por interceptación alcanzan un 25%.



**Figura 17.** El proceso de transpiración: el agua se absorbe por las raíces y se libera a través de los estomas de las hojas – flujo ascendente a través de la albura.

Desde una perspectiva global, las pérdidas por interceptación son más elevadas con pequeñas tormentas frecuentes (por ejemplo, en climas templados) que en climas en los que las tormentas son menos frecuentes pero más intensas (por ejemplo, en climas mediterráneos). La pérdida por interceptación de los bosques puede variar, a escala mundial, desde un 8% a un 60% de la precipitación y de un 25% a un 75% de la evapotranspiración total. Los valores registrados en bosques mediterráneos están en el rango más bajo de estos intervalos.

A pesar de que los mecanismos atmosféricos de la transpiración e interceptación son los mismos (radiación y déficit de presión de vapor), la transpiración es un proceso controlado fisiológicamente (apertura estomática) mientras que la pérdida por interceptación es un proceso de evaporación estrictamente inducido por mecanismos físicos.

Debido a las características del clima mediterráneo (baja frecuencia de precipitaciones) la transpiración predomina sobre la interceptación en el balance hídrico de los bosques mediterráneos. Los valores que encontramos en la literatura confirman que, a escala anual, la transpiración de los bosques mediterráneos puede representar unas tres cuartas partes de la evapotranspiración total.

### Cuadro 3. Mecanismos de evaporación del suelo en zonas áridas

Los estudios sobre la humedad del suelo e intercambio gaseoso llevados a cabo en ecosistemas abiertos semiáridos del sur de España e Israel sugieren que la evaporación del suelo, en algunos casos, podría ser mayor de lo que se creía. Un estudio reciente llevado a cabo en un bosque semiárido de pino poco denso en Israel, lo confirma. La evaporación del suelo se midió mediante cámaras de intercambio gaseoso: los niveles de evaporación directa resultaron ser mucho más altos en los suelos expuestos al sol que en los sombreados; la evaporación desde el suelo fue de un 36% de la precipitación anual. Un valor tan elevado de evaporación del suelo se atribuyó al régimen local de precipitación, caracterizado por pequeños chubascos que frecuentemente re-humedecían el suelo expuesto.

La transpiración depende totalmente del agua infiltrada, almacenada en el suelo que se localiza al alcance de las raíces del árbol. Las especies de árboles adaptadas al clima mediterráneo necesitan sobrevivir a la sequía estival. Para ello, normalmente cuentan con un sistema de raíces bien desarrollado, tanto horizontalmente como en profundidad: capaz de explotar las reservas de agua almacenada. Las especies mediterráneas de hoja perenne consiguen sobrevivir a la sequía del verano bien por tolerancia a la sequía (cierre de los estomas y caída de hojas) o evitando la sequía (raíces profundas) con diferentes estrategias (ver sección 3.3). Cuando los niveles freáticos son poco profundos, las raíces pueden extraer agua directamente de estos niveles de agua subterránea. Estos rasgos resultan comunes a los árboles en todos los ambientes semi-áridos. A largo plazo, la transpiración de los bosques es siempre más elevada que la de matorrales o prados debido al sistema de raíces más desarrollado y la mayor rugosidad del dosel de los primeros.

Tanto la transpiración como la pérdida por interceptación dependen en gran medida del índice foliar (la proporción entre la suma del área de todas las hojas de los árboles y el área del suelo de una parcela determinada). Los bosques de densidad baja (que podría ser otra adaptación a la sequía) tienen menor transpiración y pérdidas de interceptación que los más densos.

**La evaporación directa desde el suelo húmedo poco profundo se asume normalmente como insignificante en áreas vegetadas (tanto en bosques, como en matorrales o prados).** Esta suposición se basa en dos razones principales: (I) el dosel de la vegetación protege la superficie del suelo de los inductores de evaporación atmosférica (radiación y viento); y (II) la cantidad de agua acumulada en la humedad del suelo es baja. Sin embargo, hay varias excepciones en condiciones áridas, tal y como se explica en el Cuadro 3.

En términos generales, la evaporación directa del suelo se puede considerar probablemente insignificante en la mayoría de las áreas forestadas, excepto en algunos bosques abiertos semiáridos sujetos a frecuentes lluvias poco intensas.

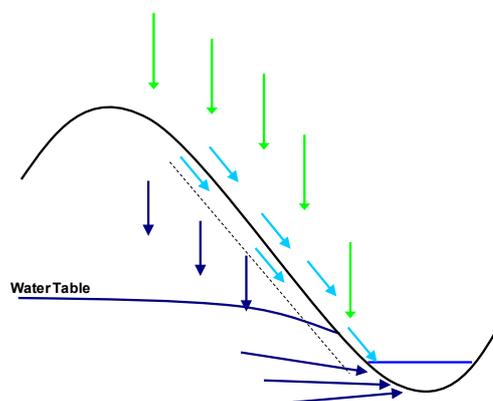
---

**A pesar de tratarse de un componente menor del balance hídrico anual de las cuencas mediterráneas, las salidas por los cursos de agua (agua azul) juegan un papel primordial en el suministro de agua río abajo a las poblaciones urbanas, a la industria y a la agricultura.**

---

Además de la evapotranspiración, la salida por los cursos de agua es la otra salida principal que se debe de considerar en las cuencas forestadas (ver ecuación I). Bajo las condiciones climáticas mediterráneas la precipitación anual resulta ser normalmente inferior a la demanda evaporativa de la atmósfera (frecuentemente evaluada como la evapotrans-

**Figura 18.** Procesos de generación de flujo: las flechas verdes indican lluvia, las azul claro indican respuestas de flujo rápido (escorrentía superficial y sub-superficial), y las azul oscuro las respuestas de flujo lento (drenaje profundo seguido de flujo subterráneo).



piración potencial (ETP)). En estas circunstancias, el caudal anual debería ser muy bajo, comparado con la evaporación total anual. Esta idea se confirma con los datos registrados tanto a nivel de cuencas como de parcelas, que muestran que el flujo de salida anual en las áreas forestadas mediterráneas normalmente no alcanza el 5% de la lluvia. En las áreas más secas y/o durante los años más secos, el flujo de salida anual resulta ser nulo lo que también resulta ser válido para otros tipos de vegetación, puesto que la evapotranspiración potencial anual sigue siendo superior a la precipitación anual.

Si las lluvias estuviesen repartidas a lo largo del año de un modo equitativo, no se daría flujo de salida en ninguna cuenca mediterránea, ya que el balance hídrico anual siempre es negativo ( $P < ETP$ ). Para poder entender las razones por las que se da un flujo de salida de agua resulta necesario abordar el problema a escalas de tiempo menor en las que el balance hídrico resulta ser positivo temporalmente ( $P > ETP$ ), es decir, durante la estación húmeda.

En este período, suele haber una entrada neta de agua al suelo y, cuando la reserva está saturada, el agua percola recargando los acuíferos subterráneos. Lo normal es que suela haber un desfase de un par de meses entre la recarga del suelo y del acuífero: el agua del suelo se recarga con las lluvias de otoño, mientras que la recarga del acuífero tiene lugar más tarde; durante el invierno. El agua almacenada en las reservas subterráneas se puede utilizar durante la primavera y verano siguientes para suministrar a las raíces profundas (si el nivel freático es poco profundo), drenar lentamente hacia el canal principal (si la geología es impermeable), puede mantenerse almacenada o drenar más profundamente saliendo de los límites de la cuenca (si el sustrato rocoso es permeable y el acuífero es profundo). El drenaje de las aguas subterráneas (ver Figura 18) y algunos flujos lentos sub-superficiales suelen dar origen a componentes del flujo retardado que pueden mantener algo de flujo en el canal durante la estación seca. Debido a su elevada evapotranspiración, los bosques suelen reducir el drenaje profundo y el flujo retardado. Durante los períodos de lluvias muy intensas, y especialmente cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa la capacidad de infiltración del suelo, pueden darse respuestas de flujo rápido como la escorrentía superficial. (ver sección 1.5). Además de la escorrentía superficial existen otros posibles mecanismos que pueden originar respuestas de flujo rápido, como el flujo sub-superficial y el flujo de saturación superficial



**Figura 19.** Torre de eddy-covarianza para evaluar el intercambio gaseoso (vapor de agua y  $CO_2$ ) entre el bosque de *Pinus pinaster* y la atmósfera en Portugal. Foto de J. Soares David.

que tienen lugar en los márgenes del lecho del río (ver Figura 18). Las respuestas de escorrentía pueden traducirse en inundaciones y erosión del suelo. La escorrentía superficial sólo tiene lugar en suelos con una capacidad de infiltración baja. Por lo tanto, el área que alimenta la escorrentía superficial no suele ser continua sino que suele estar irregularmente repartida en el espacio. Puesto que la hojarasca de los bosques y la materia orgánica contribuyen a aumentar la infiltración del suelo, la escorrentía superficial es muy poco común en los bosques, y suele aparecer en suelos expuestos y degradados. Hasta cierto punto, se considera que los bosques previenen los procesos de generación de flujos rápidos (básicamente escorrentía superficial), sin embargo, el efecto mitigador de los bosques sobre las inundaciones es más efectivo frente a inundaciones de escasa o mediana intensidad que frente a los episodios más intensos o extremos.

Los componentes de los flujos rápidos y retrasados se unen en el canal principal formando juntos el caudal de salida de la cuenca.

---

El tipo de vegetación y su densidad pueden afectar tanto a la cantidad como a la distribución del caudal de salida de la cuenca dado su efecto sobre la evapotranspiración y la infiltración en la superficie del suelo. La manipulación de la vegetación en las cuencas mediterráneas puede así jugar un papel muy importante para conseguir el equilibrio óptimo entre los diversos flujos hídricos. Para lograrlo resulta necesario considerar cuidadosamente la multiplicidad de objetivos, dado que implican tanto conflictos como compromisos entre ventajas y desventajas.

---

A escala anual, el tipo de vegetación podría jugar un papel en la evapotranspiración y, a su vez, en el caudal de salida: los tipos de vegetación con evaporación alta (como los bosques) producirían menos caudal y viceversa (ver ecuación 1). El impacto del cambio de la cubierta forestal sobre la hidrología, así como el relacionado con perturbaciones más intensas (incendios descontrolados) o acciones deliberadas de gestión (como la tala o el aclareo), se trata en las secciones 2 y 2.1.

### Lecturas recomendadas

- Bellot, J., Bonet, A., Sanchez, J.R. and Chirino, E. 2001. Likely effects of land use changes on the runoff and aquifer recharge in a semiarid landscape using a hydrological model. *Landscape and Urban Planning* 55: 41–53.
- Bellot, J. and Ortiz de Urbina, J.M. 2008. Soil water content at the catchment level and plant water status relationships in a Mediterranean *Quercus ilex* forest. *Journal of Hydrology* 357: 67–75.
- Chirino, E., Bonet, A., Bellot, J. and Sánchez, J.R. 2006. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain. *Catena* 65: 19–29.
- David, J.S., Valente, F. and Gash, J.H.C. 2005. Evaporation of intercepted rainfall. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Anderson, M.G. (Ed.). Volume 1, Chapter 43. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. Pp. 627–634.
- Jewitt, G. 2005. Water and Forests. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Anderson, M.G. (Ed.). Volume 5, Chapter 186. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. Pp. 2895–2909.
- Pereira, J.S., David, J.S., David, T.S., Caldeira, M.C. and Chaves, M.M. 2004. Carbon and water fluxes in Mediterranean-type ecosystems. Constraints and adaptations. In: *Progress in Botany*, Vol. 65. Esser, K., Luttge, U., Beyschlag, W. and Murata, J. (Eds.). Springer-Verlag, Heidelberg. Pp. 467–498.

## El papel del bosque mediterráneo en la conservación del suelo y del agua

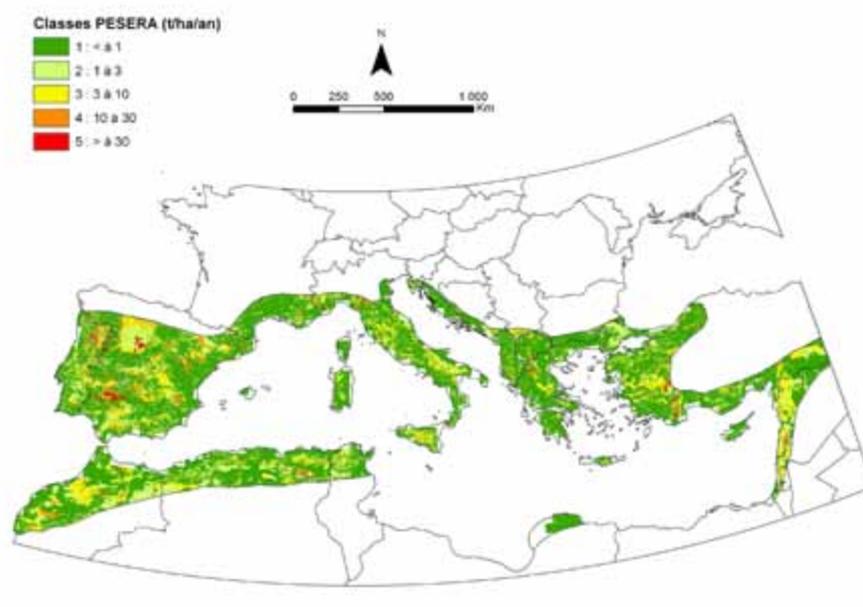
Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante y Hedi Hamrouni

Los suelos mediterráneos son un componente muy frágil de los ecosistemas terrestres. Son susceptibles a la erosión al estar expuestos a fuertes e intensas lluvias, seguidas de intensa escorrentía que se aceleran debido a la topografía montañosa. Por lo tanto, agua y el suelo se deben considerar conjuntamente.

Como ya se ha comentado en la sección 1.4, los regímenes de lluvia en el Mediterráneo se caracterizan por eventos meteorológicos intensos, con una importante fracción de la precipitación anual concentrada en pocos días. Estos rasgos combinados con el uso intensivo y destructivo del suelo (aclareo de los bosques, sobrepastoreo e incendios) a lo largo de milenios han tenido como resultado una evolución ecológica del ecosistema terrestre acusadamente regresiva, especialmente debido al marcado fenómeno de la erosión. La erosión del suelo sigue siendo un fenómeno de la mayor importancia tal y como se ilustra en las Figuras 20, 25 y 26.

Por ejemplo, dos extensas áreas climáticas de la Península Ibérica y el Magreb se caracterizan por suelos desarrollados sobre una roca madre formada por calizas y margas de los períodos Cretácico y Terciario. La región semiárida se caracteriza por lluvias de entre 300 y 600 mm, una variabilidad interanual de entre el 25% y el 50% y entre 4 y 7 meses secos. Las condiciones climáticas, que fueron antiguamente muy húmedas, condujeron a la diferenciación de suelos isohúmicos\*, suelos rojos fersialíticos\* más o menos incrustados en caliza o, en condiciones de menor drenaje, en las margas, suelos inundados. En estas áreas se encuentran formaciones climax tales como matas de acebuche, bosques de pino carrasco, cedros, enebros y cipreses. La región **subhúmeda** recibe entre 600 y 800 mm anuales de precipitación con una variabilidad de entre el 10% y el 25% y entre 3 y 5 meses secos. La humedad continua produce un oscurecimiento del suelo. Los suelos rojos se forman sobre rocas duras carbonatadas. Sin embargo, no resulta raro observar, sobre la caliza dura, suelos con tonos marrones; este oscurecimiento puede afectar total o parcialmente<sup>1</sup> al perfil del suelo. El oscurecimiento del suelo fersia-

<sup>1</sup> El oscurecimiento de los suelos fersialíticos (que es distinto del oscurecimiento por materia orgánica) resulta posible cuando las condiciones climáticas y de la cubierta del suelo son intermedias (clima sub húmedo). Sin embargo, existe también una categoría de suelo fersialítico marrón saturado de calcio (subgrupo de suelos fersialíticos).



**Figura 20.** Mapa de la erosión del suelo en la cuenca mediterránea en las condiciones actuales (Simulación PESERA). Fuente: Y. Le Bissonnais et al. 2010.

lítico es un reflejo de algunas de las características físicas esenciales como la porosidad, la reserva útil y la resistencia de los agregados a la erosión. A las formaciones climácicas anteriores se pueden añadir los robles esclerófilos: la encina (*Q. ilex*), el alcornoque (*Q. suber*) y la coscoja (*Q. coccifera*).

Las cubiertas originales del suelo han desaparecido, en mayor o menor medida, debido al clima más seco y a los ciclos geológicos de erosión. La explotación de madera desde la época fenicia (1.000 a.C.) y el aumento de la agricultura desde la época romana (200 a.C.) intensificaron la erosión antropogénica dejando un paisaje en el que las rocas, los regolitos, y las incrustaciones calcáreas (continuas o fragmentadas) quedan expuestas a la superficie. En estos paisajes, la vegetación climácica se ha deteriorado hasta constituir maquias (suelos ácidos), y garrigas (suelos calcáreos). Sin embargo, algunos bosques se han salvado, normalmente los que se encuentran en las cabeceras de las cuencas de más de 50 km<sup>2</sup> donde la cría de ganado (ovejas) es dominante.

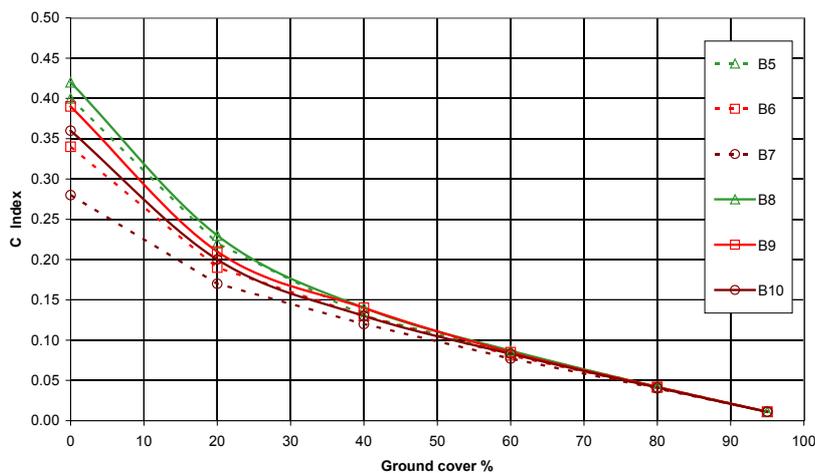
Los modelos de balance suelen tomar en consideración diversos flujos entre las cubiertas forestales y la atmósfera: el carbono atmosférico se fija en la vegetación por la fotosíntesis; se almacena en las hojas, madera, raíces y en el suelo que recibe los restos y alberga una actividad biológica más o menos intensa. Este carbono retorna mediante la respiración de las plantas o la descomposición de la materia orgánica. Los árboles, por otro lado, retornan el agua de lluvia interceptada que es evaporada desde las hojas o transpiran el agua absorbida del suelo por las raíces. Finalmente, bosques y suelos retornan parte de la radiación infrarroja recibida. Estos diferentes flujos se cuantifican principalmente en cubiertas forestales continuas y, por lo tanto, en áreas más húmedas que el Mediterráneo. Los bosques mediterráneos, con una menor biomasa, unas dinámicas de crecimiento y una intensidad de flujos que difieren de los que se dan en bosques templados e incluso más húmedos, continúan jugando un papel importante en

un contexto de subsistencia precaria de las sociedades circundantes, y de difícil gestión y conservación del agua y de los suelos – a pesar de que de norte a sur y de este a oeste del “límite de distribución geográfica del olivo” las situaciones son muy distintas. Los indicadores de las cantidades acumuladas y flujos de agua y de compuestos orgánicos y minerales permiten, dentro de ciertos límites, evaluar la fragilidad y resiliencia del binomio suelo y vegetación.

La energía liberada cuando una gota de lluvia impacta sobre el suelo puede ser controlada por la vegetación, con una cobertura de entre un 20% a un 30%, con pequeñas diferencias entre plantas, arbustos y árboles.

Los procesos de erosión del suelo relacionados con el agua consisten en:

- El impacto de la energía cinética de las gotas de lluvia al caer que dan como resultado la fragmentación de los agregados del suelo en partículas más finas,
- El papel de la escorrentía que actúa como medio de transporte de esas partículas, y
- El papel de la escorrentía como agente erosivo (formador de cárcavas).



**Figura 21.** Papel de la cubierta vegetal en el control de la energía de las gotas de lluvia : índice C para varios tipos de cubiertas (C= 1 en ausencia total de de interceptación sobre un suelo desnudo: una situación que presenta la máxima vulnerabilidad).

- B5: 25% de estrato arbustivo con gotas de lluvia cayendo desde 2m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.
- B6: 50% de estrato arbustivo con gotas de lluvia cayendo desde 2m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.
- B7: 75% de estrato arbustivo con gotas de lluvia cayendo desde 2m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.
- B8: 25% de estrato forestal con gotas de lluvia cayendo desde 4m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.
- B9: 50% de estrato forestal con gotas de lluvia cayendo desde 4m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.
- B10: 75% de estrato forestal con gotas de lluvia cayendo desde 4m + cubierta de suelo herbácea con frondosas.

Estos mecanismos dependen de las características de la cubierta vegetal desde el índice foliar que intercepta parte de la lluvia, reduciendo el efecto de salpicadura y contribuyendo a la reemisión de agua a la atmósfera a través de la evaporación (ver sección 1.4), hasta los sistemas radicales que limitan la movilidad de las partículas del suelo. Por supuesto que erosión y escorrentía están relacionadas con las características del suelo, en particular con la estabilidad estructural y las características hidrodinámicas.

Los efectos del bosque empiezan con la interceptación del agua de lluvia antes de que llegue al suelo. Dependiendo de las condiciones ecológicas locales se encuentran diferentes tipos de plantas y organizaciones estructurales que interfieren enormemente con el efecto **mecánico de las gotas de lluvia** y la génesis de la escorrentía, del mismo modo que lo hacen con la **movilización del suelo erosionable**.

La fracción que representa la interceptación en la ecuación del balance hídrico se discute en la sección 1.4. En las líneas que siguen se hace énfasis en la estructura de la vegetación y su papel para controlar la energía de las gotas de lluvia. La importancia de este factor se ha tomado en consideración al desarrollar nuevos modelos para predecir la erosión por el agua, valorando la interceptación de la energía mecánica de las gotas de agua en diversos tipos de cubierta vegetal desde árboles hasta cubiertas herbáceas. La Figura 21 ilustra los valores de la cubierta del suelo y del índice C en diversos tipos de cubierta vegetal, que se corresponden a diferentes combinaciones de alturas y densidades del dosel y de cobertura del suelo. Se puede concluir de que las diferencias entre los tipos de cubierta vegetal resultan escasas por encima de un umbral de cubierta del suelo del 20% al 30%, es decir, la vegetación arbustiva puede ser tan eficiente (e incluso mejor) que los bosques en lo que al control del efecto mecánico de las gotas de lluvia se refiere. En términos de balance hídrico la vegetación arbustiva consume, en general, menos agua que los bosques.

---

Los suelos forestales presentan una ventaja comparativa frente a otros tipos de suelo en lo que a porosidad y conductividad hidráulica se refiere, y resultan menos susceptibles a los efectos mecánicos de las gotas de lluvia.

---

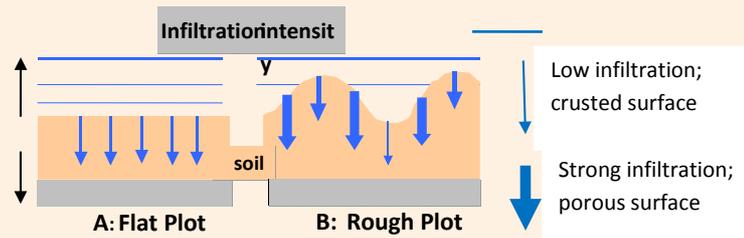
Cuando el agua del flujo cortical, la interceptada por las hojas y las gotas de lluvia llegan al suelo, pueden ocurrir varios procesos. Se inicia el **recarga de agua** de las capas del suelo, seguido de la **infiltración** a niveles más o menos profundos, normalmente antes de que tenga lugar la **escorrentía**. Las características del suelo juegan un papel importante en la importancia relativa y la intensidad de estos procesos. En gran parte están relacionados con el tipo de ecosistema que controla las **transformaciones físicas y bioquímicas de las capas superiores**, facilitando la recarga del suelo y el drenaje profundo.

En el caso de los bosques, diversos estudios demuestran que:

- En los bosques de frondosas, se observan cambios estructurales de los horizontes superficiales relacionados con los compuestos húmicos polimerizados que estabilizan la estructura de los horizontes superficiales. Sin embargo esta acción resulta más limitada en los bosques de pino y teca y resulta casi nula en los bosques de eucalipto, cuya hojarasca segrega sustancias antibióticas que limitan la mineralización y humificación de los restos orgánicos.

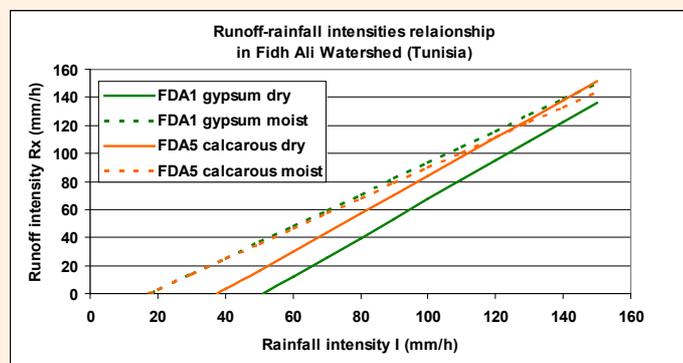
#### Cuadro 4. Lluvia, infiltración y escorrentía

En una simulación de lluvia se descubrió que la intensidad de la infiltración mínima  $F_n$  (mm/h), o la intensidad máxima de la escorrentía  $R_x$  (mm/h), varían con la intensidad de la lluvia ( $I$  mm/h). Esta relación, que puede parecer sorprendente, resulta de la variabilidad lateral de la conductividad hidráulica saturada  $K_{sat}$  (mm/h) que, bajo una intensidad de lluvia constante, corresponde a  $F_n$  (mm/h). Esta propiedad fundamental se explica en la Figura 22.



**Figura 22.** Relación entre la rugosidad del suelo y la conductividad hidráulica saturada,  $K_{sat}$  (mm/h). **Situación A, llanura:** en una llanura el suelo se cubre de una corteza homogénea;  $K_{sat}$  tiene el mismo valor en cualquier punto. En cuanto la intensidad de la lluvia ( $I$ ) excede la  $K_{sat}$ , aparecen la escorrentía. El flujo sólo depende de la intensidad de la lluvia y de la pendiente del suelo.

**Situación B, suelo irregular:** las costras calcáreas resultan más susceptibles en la parte más baja del terreno; se ven afectadas por sus bordes laterales, que resultan más permeables independientemente de que lo sean más o menos en su zona superficial. La  $K_{sat}$  varía de un punto a otro, el número de lugares en los que  $I > K_{sat}$  aumenta con la altura del flujo de agua. Este es el caso de terrenos de superficie irregular, tierras cultivadas, terrenos con elevada actividad biológica y con una cubierta vegetal densa – todas ellas constituyen superficies irregulares– que quedan, como resultado, irregularmente sumergidas bajo el flujo de agua de escorrentía. La Figura 23 ilustra estos comportamientos mostrando la relación entre las escorrentías de superficies con regímenes fijos ( $R_x$ ) y las intensidades de la lluvia ( $I$ ):



**Figura 23.** Relación escorrentía-intensidad de la lluvia en la Cuenca del Fidh (Túnez)

Relación entre la intensidad máxima de la escorrentía  $R_x$  y la intensidad de la lluvia ( $I$ ) para suelos con yeso (FDA1) y calizos (FDA5) con dos contenidos iniciales de humedad en el suelo.

Obsérvese que la intersección de las líneas de regresión con la abscisa determina la intensidad de la lluvia ( $I_{lim}$  mm/h) que provoca el flujo inicial. Este valor se obtiene experimentalmente reduciendo gradualmente la intensidad de la lluvia simulada. FDA1 es un suelo derivado de margas yesíferas, las superficies son rugosas con agregados bien formados pero inestables. Con la lluvia, se dispersan dando origen a un material arcilloso-limoso FDA 5 derivado de la caliza. Las superficies se suavizan rápidamente con una cubierta arenoso-limoso que presenta baja infiltración. Sobre un suelo inicialmente seco el comportamiento de ambos es paralelo pero con diferentes límites de intensidad de lluvia: 51 mm/h para FDA1 y 37 mm/h para FDA5. **Sobre un suelo inicialmente húmedo, los comportamientos convergen en las superficies que se suavizan alcanzan idénticos valores umbral ( $I_{lim}$  18,5 mm/h).**

- La actividad biológica animal y microbiana facilita la porosidad. Los gusanos segregan 3t/ha de excrementos orgánicos en los bosques frente a las 0,5t/ha que segregan en suelos biológicamente menos activos. Esta actividad limita el desarrollo de la costra superficial y favorece la conductividad hidráulica superficial así como, desafortunadamente, la movilización y erosión de los suelos poco profundos de montaña.
- La hojarasca o la cubierta herbácea proporcionan una protección añadida del suelo superficial, al actuar como un mantillo, dispersando la energía en las proporciones mostradas en la Figura 21.
- La porosidad profunda se ve favorecida por el desarrollo de las raíces; aunque este hecho depende de la estructura del sistema radical, el tamaño de las raíces (superficie pilosa, sistema pivotante, etc.) y de su estado de salud.

---

La escorrentía depende del estado de la superficie del suelo, del contenido inicial de agua en el mismo y, por supuesto, de la intensidad de la lluvia. La cubierta forestal retrasa su inicio e impide, o reduce, el establecimiento de escorrentía intensa.

---

La aplicación de **técnicas de simulación de lluvias** en los estudios sobre la erosión hídrica-escorrentía y movilización– han alcanzado notable desarrollo en el Magreb sobre suelos formados por materiales de diferente grosor, así como en áreas tanto secas como húmedas en al África subsahariana. El **estado de su superficie (SS)** resulta más relevante que la diferenciación en suelos “más o menos” profundos, ya que controla muchas de sus propiedades frente al agua. La escorrentía aparece cuando la intensidad de la lluvia sobrepasa la conductividad hidráulica saturada, tal y como se explica en el Cuadro 4. El proceso de infiltración también se relaciona con la porosidad del suelo y con la rugosidad de su superficie.

---

Las pérdidas del suelo como sedimento en las aguas de escorrentía y su dinámica durante los episodios de lluvia dependen, entre otros factores, del estado de la superficie del suelo. Bajo la cubierta forestal, comparado con otro tipo de cubierta vegetal, la limitación de la erosión va unida al retraso en el inicio de la escorrentía y al hecho de que se dificulta el establecimiento de un régimen intenso de escorrentía, como ya se ha mencionado.

---

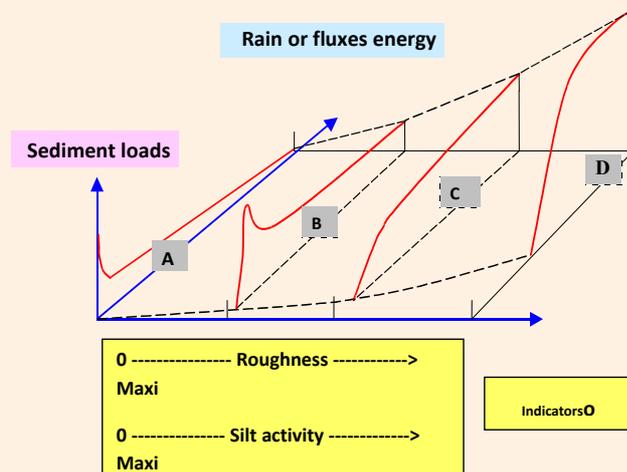
Las técnicas de simulación de lluvia son también muy útiles para evaluar la evolución de las cargas de sedimento relacionadas con el aumento de la intensidad para diferentes SS. El Cuadro 5 resume el inicio de la erosión y la dinámica del sedimento en relación al flujo y a la superficie del suelo.

### Cuadro 5. Génesis de la erosión y carga de sedimentos según el flujo y parámetros de la superficie del suelo

La Figura 24 ilustra el comportamiento de cuatro tipos de suelo contrastados según la carga del sedimento en relación con la lluvia y el flujo de energía. La Curva A refleja el comportamiento de un suelo con muy poca estabilidad estructural. El colapso de los agregados por disipación de la energía de la lluvia homogeneiza la superficie y forma un revestimiento con escasa infiltración. La energía del flujo de agua es disipada por la superficie. El flujo se mantiene laminar y resulta menos abrasivo. Gradualmente se aprecia una disminución de las partículas exportables del suelo. El aumento de la carga de sedimento está unido principalmente a un fuerte aumento de la escorrentía. La Curva D refleja el comportamiento del suelo con mayor estabilidad estructural. El colapso de los agregados al disipar la energía de la lluvia es mucho más gradual. El retraso en el inicio de la escorrentía también se explica por los poros presentes en la superficie del suelo. El revestimiento del suelo es frágil y de estructura porosa. La superficie no se homogeneiza excepto durante lluvias importantes. Puesto que el flujo de agua no es muy abundante, la escorrentía no afecta a toda la superficie. Hay poca disipación de energía en la superficie, así que el efecto mecánico de las gotas de lluvia persiste. Puesto que la superficie es rugosa, el flujo se vuelve turbulento y, por lo tanto, abrasivo. Como resultado, hay un rápido aumento de la erosión que puede parecer contradictorio puesto que es la estabilidad estructural la que está en el origen del proceso. Aquí, el control de la erosión depende del retraso en el inicio de la escorrentía y con el establecimiento lento del régimen de escorrentía intensa – lo primero que los “conservacionistas” de tierras agrarias o agentes forestales deben considerar.

**Figura 24.** Cargas de sedimentos según el flujo y las características de la superficie.

Considerando lo anteriormente expuesto, las situaciones intermedias ilustradas por las curvas B y C resultan fáciles de interpretar. Los cambios en las cargas de sedimentos están asociados a las diferentes condiciones de rugosidad, actividad de los minerales de la arcilla (expansión y contracción), estructuración o desintegración de la carga salina, costras y la disgregación de elementos gruesos que actúan como excelentes indicadores del comportamiento del suelo.



El papel de la cubierta forestal en la conservación del agua y del suelo en el Mediterráneo resulta bastante diferente de los clichés que con demasiada frecuencia se sugieren y aceptan, considerando que los bosques suponen una protección total contra los procesos de erosión.

Hay muy pocas cuencas forestadas experimentales que permitan el estudio conjunto de hidrología y erosión del suelo en el área mediterránea. Es más, se han llevado a cabo muy pocos estudios de simulación de precipitaciones en condiciones de bosque. Sin embargo, los resultados de estos estudios se pueden complementar con hipótesis razonables derivadas de otras áreas agrícolas de estudio intensivo debidamente seleccionadas

**Figura 25.** Formación de badlands o malpaís sobre roca madre calizo-margosa que resulta de la desaparición del matorral. Cuenca del Tleta, Presa de Ibn Batouta; Rif occidental, Marruecos. Foto: P. Zante.



**Figura 26.** Erosión sobre limos calizos (sur del puente Fahs, Túnez). Foto: P. Zante.



para reflejar las condiciones de los suelos forestales. Valgan como ejemplo los datos basados en estudios de simulación de lluvia en Túnez en campos de cultivo comparables con los SS de los suelos forestales, que se han agrupado en: vegetación baja sobre suelos con agregados estructurales y revestimiento, suelos desprovistos de vegetación con revestimiento, suelo desnudo rugoso con agregados estructurales y revestimiento y suelo con elementos gruesos diseminados (ver Tabla 3).

La localización y extensión de los bosques de las áreas calizas del Mediterráneo y la profundidad de los suelos en los que crecen, dependen a menudo del tamaño de las cuencas.

**En áreas de cuencas de pequeña extensión** estrictamente calcáreas (<10 km<sup>2</sup>), los suelos forestales de las cabeceras se erosionan hasta el regolito, excepto en el piedemonte donde los coluvios forman suelos más profundos. En la cabecera, los bosques se localizan sobre rocas o costras calizas en las que el agua útil se desvía provocando condiciones de baja humedad. En estas condiciones, estos bosques dependen de la meteorización de este material para su existencia. En el suelo, se suceden una serie de estados dependiendo del periodo del año:

**Tabla 3.** Estudios de simulación de lluvia en la región Siliana, Túnez. Precipitación media (30 años) 430 mm; erosividad de la lluvia: 57–130 megajulios.mm/ha.h al año. Resultados de escorrentía y erosión en relación con el estado de la Superficie del Suelo (SS) en parcelas cuyo comportamiento resulta comparable al de los suelos de los bosques mediterráneos.

Suelo y profundidad	Lugares	Topo	Pendiente	C+S	Uso del suelo	SSF				Escorrentía		Erosión
						7 Costra formada por material erosionado	8 Costra estructural	9 Cracks arcillosos	10 Grava	11 Rx (l) r <sup>2</sup>	12 l lim	
Caliza marrón sobre caliza margosa (30cm)	SM1	Cabecera	19	52	Sin arar	45	45	4	0	1,061-10,1 0,98	9,5	0,008R <sup>2</sup> - 0,086R + 11,97 0,98
	SM2	Tramo medio	12	50	Barbecho	78	18	0	1	1,031-11,9 0,97	11,6	0,006R <sup>2</sup> - 0,033R + 13,26 0,92
	SM3	Tramo bajo	10	45	Trigo + maleza	59	23	0,5	0	1,051-24,4 0,93	23,3	0,275R + 3,63 0,95
Caliza marrón compactada sobre coluvios (70cm)	SML3	Cabecera	8	54	Semilleros de trigo	54	24	4	2	0,951-15,6 0,98	15,7	0,004R <sup>2</sup> - 0,352R + 25,44 0,79
	SML2	Tramo medio	10	50	Recién arado	16	54	6	0	Rx no disponible	> 42	Carga máxima 4.4g/l a l=120 mm/h
Afloramientos dispersos de costras calcáreas fragmentadas (0cm)	SML1	Tramo bajo	13	48	Casi sin arar	72	16	5	5	1,001-6,4 0,97	6,4	-0,004R <sup>2</sup> + 1,392R - 2,7 0,87
	SMA1	Tramo medio	12	49	Casi sin arar	44	20	0	34	0,951-2,1 0,96	2,2	0,002R <sup>2</sup> - 0,125R + 9,99 0,70
	SMA3	Tramo medio	9	62	Barbecho+caña	28	9	0	12	1,091-23,3 0,97	21,2	0,016R + 0,82 0,82
	SMA4	Tramo medio	15	63	Recientemente arado	33	12	1	7	0,911-1,10 0,89	12,1	0,001R <sup>2</sup> + 0,015R + 2,35 0,69

Legenda:

1. Clasificación del suelo (CPCS), material de origen y profundidad del suelo (<50EG).
2. Lugares de simulación de lluvia con diferentes toposecuencias en la región Siliana (Túnez).
- 3, 4. Posición topográfica en pendientes de 300 a 1.000 metros de longitud y pendiente en %.
5. Textura del suelo: arcilla (< 2 micras) + limo fino (2–20) + limo grueso (20–50) en % de suelo sin contabilizar la grava.
6. Uso agrícola del suelo durante los ensayos.
- 7, 8, 9 10. Características de la superficie del suelo: costra, costra estructural, (agregados o terrones más o menos colapsados rodeados de material de dispersión de esas estructuras) grietas de desecación en suelos de arcilla; proporción de grava (2 a 20 mm) y cantos (>20 mm) sobre el suelo.
- 11, 12. Relación entre intensidad de la escorrentía a velocidad constante y la intensidad de la precipitación; límite mínimo de intensidad l.
13. Relación entre la carga de sedimento que arrastra la escorrentía y la intensidad de la misma R, detección de erosión areolar o lineal.

El inicio de las lluvias de Septiembre–Octubre en suelos pedregosos, sin brotes y con algunos rastrojos, tal y como se refleja en la Tabla 3 por el SMA<sub>1</sub> dan como resultado una escorrentía rápida pero ligera durante las lluvias más intensas.

El inicio de la estación lluviosa con un descenso más o menos significativo hasta las tormentas de abril y mayo, el crecimiento de una cubierta herbácea en el SMA<sub>3</sub> con una escorrentía que arrastra materiales ligeros y que cada vez aparece más retrasada respecto de la lluvia a medida que la capa herbácea crece y se hace más continua

En la cabecera de **la cuencas más grandes (>50 km<sup>2</sup>)** no es raro encontrar suelos fersialíticos profundos y rojos relictos con nódulos de caliza que no han sido afectados por los ciclos de erosión pero que pueden estar cerca de afloramientos rocosos. Los bosques, que se asientan sobre materiales estructurados, se mantuvieron en estas áreas gracias a los óxidos de hierro y los compuestos húmicos polimerizados. Puesto que estos suelos tienen buenas reservas de agua y áreas de alta conductividad, la vegetación crece con rapidez desde octubre a mayo. Llegamos a las siguientes situaciones sucesivas: SM<sub>1</sub> a SM<sub>2</sub> a SM<sub>3</sub> con una escorrentía ligeramente cargada de materiales y un cada vez más bajo umbral de la intensidad de la lluvia que, por lo tanto permite la recarga de la reserva de agua útil.

En estas cuencas, las **margas** a veces se disuelven en los lechos de caliza dando origen a los paisajes de conocidos como *badlands* (malpaís). La erosión areolar sobre los lechos de caliza (<5t/ha/año) se vuelve lineal con picos de unas 50t/ha/año.

No hay bosque, sino vegetación arbustiva baja con escasa herbáceas o superficies desnudas ya que sus reservas de humedad son escasas. La continua abrasión evita la germinación. Los comportamientos son similares a los de SML<sub>2</sub> y, posteriormente, en los puntos con características SML<sub>1</sub>, donde el colapso de las estructuras suministra pesadas cargas que son arrastradas por la escorrentía que, en un principio, se habían retrasado pero que una vez colapsan estas estructuras, crece con rapidez.

---

**Resulta necesario avanzar en la investigación para desarrollar un cuerpo de conocimientos sobre la conservación de agua y suelo en las condiciones de los bosques mediterráneos. Un programa de investigación concertado alrededor de la cuenca mediterránea podría ofrecer perspectivas interesantes.**

---

Son poco comunes los estudios detallados que analizan los factores que afectan al comportamiento del tándem bosque/suelo. Los enfoques experimentales deben preceder al trabajo de modelización, ya que resultan necesarios para mejorar la calibración de los modelos y permitir su validación. Un ejemplo de experimento de campo fácil y rápido de poner a punto puede consistir en la simulación de precipitaciones en parcelas representativas de las características de los suelos y las cubiertas y cuyas características se puedan asociar con facilidad a los episodios de la lluvia natural. Estos enfoques requieren tomar en consideración las características fenológicas del bosque (estratos arbóreo y arbustivo) y tomar en consideración los cambios de energía relacionados con la intercepción de la lluvia.

### Lecturas recomendadas

- Bellot, J. and Escarre, A. 1991. Chemical characteristics and temporal variations of nutrients in throughfall and stemflow of three species in Mediterranean holm oak forest. *Forest Ecology and Management* 41: 125-135.
- Casali, J., Lopez, J. and Giraldez, J.V. 1999. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain). *Catena* 36: 65-84.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133.
- Roose, E.J., Lal, R., Feller, C., Barthes, B. and Stewart, B.A. (eds.) 2005. *Soil Erosion and Carbon Dynamics*. CRC Press, Boca Raton, FL. 376 p.
- Roose, E., Albergel, J., De Noni, G., Laouina, A. and Sabir M. 2008. Efficacité de la gestion de l'eau et de la fertilité des sols en milieux semi-arides. Actes de la session VII organisée par le Réseau E-GCES de l'AUF au sein de la conférence ISCO de Marrakech (Maroc). AUF - IRD - ENFI. Editions des archives contemporaines. 402 p.

# 2.

## El agua azul

**E**l agua azul, la forma líquida del agua, resulta vital para las sociedades humanas razón por la cual ha sido el objetivo de gestores y planificadores del uso del suelo en un intento de “domesticar” los recursos hidrológicos. Es esencial entender cómo se genera el agua azul a través de variados y complejos procesos hidrológicos que tienen lugar en las cuencas antes, durante y después de la lluvia. La lluvia cae sobre los diferentes ecosistemas terrestres que tienen comportamientos hidrológicos diferentes. En el Mediterráneo y en otras regiones, los bosques ocupan con frecuencia las cabecezas de las cuencas que, a menudo, se encuentran en áreas montañosas y constituyen una especie de “depósito de agua” para la región. Por lo tanto es crucial entender mejor las características hidrológicas específicas de estos ecosistemas.

El tema de las relaciones e interacciones entre bosques y agua azul es uno de los más controvertidos. A pesar de los avances científicos basados en estudios hidrológicos, todavía quedan muchos conceptos generalmente aceptados y creencias dogmáticas que no tienen una base científica o es muy limitada. Por lo tanto, resulta absolutamente necesario intentar tender un puente entre la ciencia y la percepción del público.

Este capítulo pretende presentar una visión general de lo que la ciencia nos puede explicar sobre estos temas tan importantes, y está dividido en dos secciones:

- 2.1 Hidrología de los sistemas mediterráneos
- 2.2 Los recursos hidrológicos y su dependencia de la cubierta vegetal y el uso del suelo

**Figura 27.** Presa para medir el caudal. Copyright Hubbard Brook Experimental Forest. Fuente: USDA, [www.hubbardbrook.org](http://www.hubbardbrook.org)



**Figura 28.** El cañón del Ardèche en un paisaje dominado por encinas y robles. Foto: C. Birot.



## 2.1. Hidrología de los ecosistemas mediterráneos<sup>1</sup>

Francesc Gallart y Pedro Berliner

---

La mayoría de los recursos hidrológicos del Mediterráneo se generan en las montañas húmedas, mientras que las áreas costeras y tierras bajas son consumidoras de agua.

---

A causa de su historia geológica, la cuenca mediterránea está rodeada de abundantes cadenas montañosas. Las precipitaciones más elevadas y las temperaturas más bajas de estas áreas de montaña se traducen en un balance hídrico positivo (con exceso de agua), por lo que resultan ser la fuente de los principales cursos de agua o de las zonas de *recarga*\* de las aguas subterráneas.

Los bosques son la cubierta del suelo más propia de las montañas mediterráneas, donde la abundancia de agua permite su crecimiento. Sin embargo, las pendientes soleadas y poco empinadas en las montañas de altitud media se han destinado habitualmente a la agricultura. La mayor parte de las áreas de mayor altitud se deforestaron y gestionaron para conseguir pastos con los que alimentar el ganado durante el verano.

Las tierras bajas mediterráneas acostumbran a presentar balance hídricos desfavorables debido tanto a la escasa precipitación como a las altas temperaturas. En la mayoría de las depresiones internas y las llanuras litorales existe una demanda creciente de agua para regar y para uso urbano que suelen ser satisfechas con recursos de origen lejano.

Los recursos de agua subterránea son de una importancia primordial en la mayoría de las áreas mediterráneas. En las zonas con un lecho rocoso permeable como la caliza (las áreas cársticas) se da un caso particular pues tienen simas y valles secos en las tierras altas y fuentes de agua de larga duración, riachuelos y humedales a los pies de las colinas y en las depresiones.

La extracción intensiva de aguas subterráneas ha inducido la desecación de las fuentes y humedales así como la disrupción del régimen de los torrentes.

Los cursos de agua varían muchísimo con el tiempo en el Mediterráneo. Las pequeñas cuencas nutren los típicos riachuelos efímeros o esporádicos (ramblas, ouadis). Los grandes cursos dependen generalmente de las aguas subterráneas.

---

<sup>1</sup> Ver secciones 1.4, 1.5, 2.2, 4.1 y 5.3

---

Los hidrólogos suelen dividir los flujos de agua en flujos de tormenta y flujos de base. Los primeros son la respuesta rápida a un episodio de precipitación dado, mientras que los segundos se deben a la descarga diferida de depósitos subterráneos, normalmente tras una fluctuación estacional.

---

En las áreas secas y especialmente en las cuencas pequeñas, puede que el flujo de base sea nulo debido a la falta de aguas subterráneas o su desconexión con ellas; la respuesta del caudal a las tormentas toma la forma de cortas pero repentinas *crecidas\** cuyo volumen suele descender en el tramo bajo debido a las *pérdidas de transmisión\**.

Las cuencas más grandes acostumbran a tener un régimen estacional con flujos altos mensuales o cuatrimestrales durante el invierno o los equinoccios, y flujos bajos o nulos en verano. Sin embargo el régimen puede variar si las fuentes principales dependen de la nieve que se funde lejos de la zona o viene regulado por embalses.

---

Los principales procesos de generación de recursos de agua en el Mediterráneo están relacionados con la percolación a niveles profundos, una vez alcanzada la capacidad de retención de agua del suelo (como en los climas más húmedos) pero también, como suele ocurrir en climas más secos, con el hecho de que la precipitación exceda la tasa de infiltración en los horizontes superficiales del suelo, lo que da como resultado *es-correntías* que causan erosión y riesgo de inundaciones.

---

Hay dos tipos de procesos principales que generan recursos hídricos. Por un lado, los procesos de  **saturación**  que son frecuentes en las zonas húmedas y tienen lugar cuando la lluvia o la nieve derretida exceden las demandas de evapotranspiración durante un

#### **Cuadro 6. Las crecidas causadas por lluvias fuertes e intensas en el Mediterráneo pueden acabar en catástrofes: el caso de Vaison-la-Romaine, Francia, 1992.**

El clima de las tierras interiores de montaña del Mediterráneo francés, que se extienden desde los Pirineos hasta los Alpes secos sudoccidentales se caracteriza por un régimen de lluvias que predominan en otoño-invierno. Los acontecimientos extremos – en términos de cantidad e intensidad de las precipitaciones– como las crecidas catastróficas han ocurrido con frecuencia. El 22 de septiembre de 1992 una fuerte lluvia azotó los departamentos de Drôme y Vaucluse (Alpes secos sudoccidentales) con precipitaciones que llegaron a los 200 y 300 mm en sólo 3-4 horas, comparados con la media de 80 mm para todo el mes de septiembre. La mayor parte de la lluvia cayó en menos de dos horas, con intensidades que llegaron a alcanzar los 200 mm/h. Esta lluvia afectó a parte de la cuenca del Ouvèze y dio origen, como resultado, a una crecida brutal que tuvo su pico máximo sólo unas pocas horas después del inicio de la precipitación. En la cabecera del Vaison-la-Romaine, la cuenca (587 km<sup>2</sup>) recolectó 66 millones de m<sup>3</sup> de agua. En el punto álgido de la inundación, el flujo era de unos 1.000 m<sup>3</sup> /s en el puente romano de Vaison-la-Romaine (ver Figura 29) y el río arrastraba objetos diversos a una velocidad de 4 m/s (14 km/h) (Fuente: Cemagref-Lyon). El flujo del río y el exceso de flujo provocaron daños importantes tanto por la pérdida de vidas humanas (40 víctimas mortales) como de infraestructuras. Carreteras, varios puentes y más de 100 casas fueron destruidas con pérdidas estimadas en 100 millones de Euros.

[http://pluiesextremes.meteo.fr/evenements-memorables\\_r4.html](http://pluiesextremes.meteo.fr/evenements-memorables_r4.html)



**Figura 29.** Crecida repentina en Vaison-la-Romaine el 22 de septiembre de 1992. Este puente romano, construido en el siglo I d.C. sobre el río Ouvèze resistió la inundación mientras que otros puentes y edificios más modernos no la resistieron. Foto: M.J. Tricart.

período de tiempo lo bastante largo como para permitir que se saturen perfiles enteros de suelo más allá de su capacidad de retención de agua, el exceso de agua fluye por la superficie y a través del suelo, alimenta los cursos de agua y filtra en profundidad para recargar los recursos subterráneos. Por otro lado, los procesos resultantes del **exceso de lluvia** que son normales en climas húmedos, tienen lugar cuando la lluvia excede a la tasa de infiltración de agua en el suelo, el exceso de agua fluye por la superficie del suelo, alimenta los cursos de agua y origina crecidas, provoca la erosión del suelo y puede contribuir a la recarga de los recursos subterráneos. (ver Cuadro 6).

Una de las características principales del clima mediterráneo es la alta estacionalidad y las bajas precipitaciones en verano. Esto significa que incluso en las áreas húmedas y subhúmedas en las que los procesos de saturación son más corrientes, la humedad del suelo se reduce durante el verano, causando la interrupción de los procesos de saturación. A la inversa, durante los períodos húmedos, los procesos de saturación pueden tener lugar estacionalmente u ocasionalmente en climas semiáridos.

---

**Las características de la cubierta y de la superficie del suelo juegan un papel importante y a la vez complejo en los procesos hidrológicos y erosivos.**

---

Normalmente los suelos con una cubierta vegetal baja o desprotegidos favorecen la escorrentía y la erosión, mientras que las cubiertas herbáceas densas causan escorrentías intermedias y tasas de erosión bajas. Una cubierta forestal densa determina los niveles de erosión y escorrentía mínimos, a condición de que la cantidad de lluvia se mantenga por debajo de cierto umbral.

Las tasas de infiltración en el suelo dependen más de la condición en que se encuentra el horizonte superficial del mismo que de la calidad de todo el perfil. El impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie desprotegida del suelo puede llevar a la formación de una costra casi impermeable que limita la infiltración e incrementa el flujo superficial de agua. La actividad biológica (raíces, gusanos) y los cultivos rompen la costra del suelo y aumentan su capacidad de infiltración.

En condiciones de clima húmedo, la humedad del suelo es menor bajo la cubierta boscosa que en los claros debido a la mayor evapotranspiración. En condiciones secas, cuando el contenido de agua del suelo es demasiado bajo para ser drenado por gravedad, puede llegar a ser más alto bajo los árboles o arbustos debido al efecto de sombra del dosel.

Existen complejas interacciones entre los diferentes mecanismos que deben de tomarse en consideración en la gestión del suelo. Una cubierta boscosa aumentará la in-

filtración y reducirá la escorrentía, pero el balance hídrico total y la recarga del acuífero se reducirán debido a los altos ritmos de evapotranspiración real. A la inversa, un suelo desnudo provoca mayor escorrentía y erosión pero el balance hídrico será más positivo, puesto que la tasa de evapotranspiración real es más baja y la recarga del acuífero incrementará, muy probablemente, a causa de los flujos de transmisión desde el lecho del río.

En las áreas secas, las técnicas de *recolección de agua*\* (como el “meskat” y el “tabia” en Túnez) consisten en la gestión de terrenos descubiertos para producir escorrentía que regarán los árboles aislados y las pequeñas parcelas de cultivo.

---

### La conservación de la calidad ecológica de los cursos de agua mediterráneos pasa por la protección del régimen del flujo, la calidad del agua, la morfología del lecho, los bosques de ribera y el transporte de sedimento.

---

La excesiva extracción de agua, la regulación de los ríos o las alteraciones del flujo provocadas por las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden modificar gravemente el régimen natural del curso. Una modificación típica en los grandes ríos consiste en el aumento de la regularidad del flujo, lo que favorece la expansión de especies invasivas, disminuye el papel de las crecidas como fertilizador del mar y pone en peligro el transporte del sedimento.

Los sedimentos son parte del sistema fluvial. La erosión acelerada debida al uso del suelo puede causar un aumento excesivo de la carga de sedimentos; es más, el sedimento atrapado en las presas también ponen en peligro la sostenibilidad de las llanuras aluviales, deltas y playas.

El mantenimiento de bosques ribereños saludables puede representar una pequeña pérdida de agua pero regula su temperatura y la concentración nutrientes, mejorando la calidad del agua (ver sección 5.4).

### Lecturas recomendadas

- Calder, I. R., 1998. Water-resource and land-use issues. SWIM Paper 3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. [http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM\\_Papers/PDFs/SWIM03.PDF](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/SWIM_Papers/PDFs/SWIM03.PDF)
- Gallart, F., Amaxidis, Y., Botti, P., Cane, G., Castillo, V., Chapman, P., Froebrich, J., Garcia-Pintado, J., Latron, J., Llorens, P., Lo Porto, A., Morais M., Neves R., Ninov P., Perrin J., Ribarova I., Skoulikidis, N. and Tournoud, Mg. 2008.
- Investigating hydrological regimes and processes in a set of catchments with temporary waters in Mediterranean Europe. *Hydrological Sciences Journal* 53: 618–628.
- Latron, J., Llorens, P. and Gallart, F. 2009. The hydrology of Mediterranean mountain areas. *Geography Compass* 36: 2045–2064.
- Leblanc, M.J. et al. 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61(3-4): 135–150.
- Nasri, S., Albergel, J., Cudenneq, C. and Berndtsson, R. 2004. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias. *Hydrological Sciences Journal* 49(2): 261–272.

## Los recursos hidrológicos dependen de la cubierta vegetal y del uso del suelo<sup>1</sup>

Mark Robinson y Claude Cosandey

**A** lo largo de los siglos, el desarrollo humano ha llevado a la sustitución de muchos bosques naturales por terrenos agrícolas, incluyendo pastos y cultivos, así como por plantaciones comerciales. Tales cambios pueden tener, y tienen, repercusiones importantes sobre el ciclo hidrológico local y sobre los recursos hidrológicos de toda una región. Recientemente, no obstante, el abandono de la agricultura en áreas marginales ha revertido parcialmente este proceso.

---

La cubierta vegetal y su gestión pueden tener un profundo impacto en el reparto del agua y la energía.

---

La gran mayoría de estudios en cuencas han encontrado menores caudales de agua en las áreas forestadas comparadas con los cultivos, y estos resultados se justifican en los estudios de procesos que incluyen mediciones de la disminución de la humedad del suelo y de los flujos de evaporación. Ahora se acepta como norma general que la silvicultura conduce, casi inevitablemente, a una mayor evaporación lo que se debe a mayores pérdidas por interceptación del agua de lluvia en el dosel del bosque en áreas de mayor precipitación y durante la estación húmeda. En condiciones más secas esta mayor pérdida se debe a una tasa de transpiración más elevada como resultado directo del sistema radical de los árboles más extenso y profundo, lo que les proporciona un mayor acceso a las reservas del agua del suelo comparado con la vegetación más baja.

Las pérdidas por interceptación debidas a la evaporación son el primer término en la división del agua. Al contrario de las pérdidas por interceptación de los bosques templados, expuestos a lluvia frecuente de corta duración y baja intensidad, los bosques mediterráneos suelen experimentar episodios de corta duración y alta intensidad, y pierden, en proporción, menor cantidad de agua interceptada.

El efecto de la cubierta vegetal sobre las tasas de transpiración se modera gracias a la disponibilidad de agua del suelo. En áreas con una capacidad de almacenamiento limitada (por ejemplo suelos poco profundos), se limita cualquier aumento de la transpiración; sin embargo, en los bosques de ribera, cercanos a cauces perennes, las tasas

---

<sup>1</sup> Ver también las secciones 1.4, 1.5, 2.1 y 4.1

de evaporación local (transpiración) se pueden ver enormemente incrementadas con el resultado de una reducción del flujo disponible para los usuarios del río aguas abajo.

En algunos casos, como las plantaciones de eucalipto, con sus raíces de crecimiento rápido y profundo, el consumo de agua puede exceder la tasa de recarga del suelo, lo que conduce, a largo plazo, a una disminución de las reservas de agua subsuperficiales.

El impacto sobre el flujo, durante la estación seca en particular, podría quedar enmascarado por los periodos de tiempo en los que se la reserva de agua en el suelo resulta apreciable: tras la tala de árboles pueden ser necesarios varios años de recarga de agua antes de que se observe un aumento del flujo durante la estación seca.

A pesar de que el aumento *absoluto* de la evaporación (y la reducción del flujo anual) es mayor en áreas de precipitación más elevada, las mayores reducciones *en proporción* tienen lugar en el flujo de la estación seca cuando hay menos agua disponible.

---

### Mitos sobre la silvicultura y el agua:

Los efectos beneficiosos de los bosques se han exagerado a menudo por parte de los conservacionistas, con el deseo de proteger las áreas naturales, y por los silvicultores comerciales que deseaban justificar nuevas plantaciones.

Los bosques pueden aumentar, en ocasiones, los flujos de la estación seca, pero en general son más proclives a reducirlos.

La capacidad de los bosques para moderar las inundaciones es mucho más débil de lo que se suele argumentar ya que se restringe a tormentas de poca magnitud y a cuencas de tamaño limitado.

---

Lo más probable es que el impacto del bosque sobre el flujo de la estación seca se limite al área concreta ocupada por el bosque. Los bosques evaporan más agua y, en particular, la transpiración más elevada aumenta el déficit hídrico del suelo y reduce el flujo durante la estación seca. Ahora bien, en situaciones en las que la capacidad de infiltración del suelo es muy escasa, la presencia de árboles puede resultar beneficiosa al proteger el suelo del efecto erosivo de las gotas de lluvia, protegiéndolo con el mantillo que forma la hojarasca, facilitando los flujos de agua de recarga a capas más profundas por los espacios contiguos a sus raíces y aumentando el flujo de la estación seca (ver sección 1.5).

En términos de conservación del suelo y de recarga de agua, el impacto de la silvicultura depende de cómo se reparta el agua entre infiltración y escorrentía superficial. Un ejemplo extremo lo constituye un suelo sobrepastoreado, con costra superficial que haya perdido su estructura y expuesto a lluvias de alta intensidad, lo que puede dar origen a un intenso flujo superficial con mínima infiltración y recarga. El resultado puede ser un bucle que se retroalimenta ya que la pérdida de vegetación que conlleva pérdida de suelo que, a su vez, origina una mayor pérdida de vegetación y más erosión.

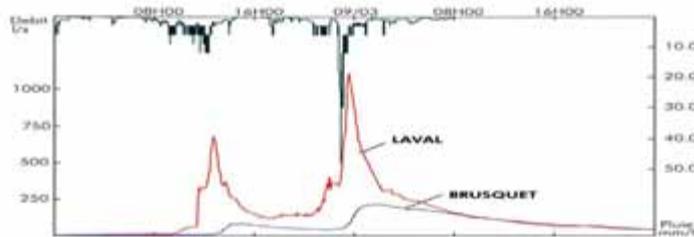
Se puede esperar que los bosques (especialmente los naturales) presenten menor erosión que los suelos agrícolas o ganaderos. Protegen el suelo de la erosión con su dosel y mantillo de hojarasca –actuando como escudo del impacto directo de las gotas de lluvia– además de mantener las partículas del suelo unidas con su red de raíces (especialmente importante en pendientes muy pronunciadas).



**Figura 30.** Las cuencas de Draix en los pre-Alpes franceses (Provenza-Alpes-Costa Azul) son cuencas de pendiente pronunciada con suelos margosos procedentes de una roca muy disgregada. El área del Draix tuvo una vez una cubierta forestal, pero hace unos 200 años los árboles fueron reemplazados por pastos y el suelo se erosionó debido al sobrepastoreo en un medio frágil. Los terrenos agrícolas del tramo bajo tienen buenos suelos que acumulan el material arrastrado por el agua desde estas colinas. Este paisaje de terreno con cárcavas ocupa unos 2.000 km<sup>2</sup> en los pre-Alpes franceses. La restauración forestal para controlar la erosión se inició en algunas zonas en 1870. Las cuencas se instrumentaron a principios de 1983.

Aunque es verdad que la erosión de los bosques naturales puede ser menor que la de otro tipo de cubierta, no es necesariamente el caso de las plantaciones en las que, pistas, canales de drenaje, explotación maderera y supresión de la vegetación del sotobosque pueden originar tasas de erosión más elevadas que una agricultura o pastoreo bien gestionados.

Es importante tener en cuenta el hecho probado de que, en muchos casos, el impacto del tratamiento no es estable a lo largo del tiempo. Los efectos de la reforestación tienen lugar *a largo plazo*, mientras que el de la deforestación se produce a muy *corto plazo*. Un bosque natural con una mezcla de especies y árboles de diferentes edades utiliza el agua de modo bastante constante a lo largo del tiempo; en contraste, un monocultivo, con árboles todos de la misma edad, puede mostrar diferencias pronunciadas a lo largo del ciclo de vida de la plantación. En el caso del eucalipto tiene lugar un período de descenso pronunciado de los aportes de agua durante las dos primeras décadas tras la plantación, mientras los árboles se establecen y crecen. Le sigue un período más largo de lenta disminución del impacto y débil aumento de los aportes de agua mientras el bosque va madurando y su crecimiento se hace cada vez más lento de modo que los aportes de agua se recuperan, al menos parcialmente. Estos resultados se han replicado en varios estudios de bosques de eucalipto y se atribuyen a que el pico máximo de transpiración del eucalipto se alcanza a los 10–20 años de vida. Parece probable, pero no está tan bien documentado que, un patrón similar de descenso en el uso del agua, pueda darse durante el crecimiento y maduración de otras especies de árboles.



**Figura 31.** Respuesta del caudal de cuencas erosionadas (Laval) y reforestadas (Brusquet) a tormentas intensas (máximo 50 mm/h) entre el 8 y el 9 de marzo de 1991 (de Lavabre y Andréassian 2000).

La corta final de un bosque puede dar como resultado un aumento, a corto plazo, de los aportes de agua, pero depende mucho de la nueva cubierta del suelo. Los pastos pueden aportar más agua, mientras que si tiene lugar la regeneración de un bosque joven de crecimiento rápido, la cantidad de agua utilizada puede diferir poco (o incluso resultar más elevada) que la del bosque maduro. En contraste, si el suelo se sobrepastorea tras la tala, da lugar a un suelo desprotegido que resulta vulnerable a la erosión y a la pérdida de capacidad de almacenamiento de agua por lo que se puede producir un aumento de los aportes de agua así como crecidas mucho más extremas.

El impacto de los bosques sobre los flujos de base está bien establecido: los flujos de base disminuyen como consecuencia de la presencia del bosque y aumentan por la deforestación. Sin embargo, incluso en este punto se producen excepciones. Las observaciones en las cuencas del Draix indican que la reforestación de los terrenos severamente acaravados puede dar como resultado una estabilización gradual y un aumento del espesor del suelo que, a la larga, dan lugar a un aumento de los flujos de base (Figuras y 30 y 31).

El impacto de la vegetación sobre los recursos hídricos se entiende ahora mucho mejor y las observaciones, a veces contradictorias, pueden ser objeto de una explicación científica. Los estudios sobre deforestación muestran un aumento inmediato de los aportes de agua, pero este incremento podría ser de corta duración, especialmente si la nueva vegetación resulta ser de crecimiento rápido. La capacidad de los bosques para transpirar más que la vegetación baja, depende de que la profundidad del suelo sea suficiente. De otro modo, la diferencia entre la evapotranspiración del bosque y la de la vegetación baja se limitará a las diferencias en sus pérdidas por intercepción. El clima es un factor importante y se relaciona con estos patrones.

Si el agua es siempre abundante las diferencias de evaporación dependerán en gran medida de la mayor rugosidad y albedo del dosel forestal, especialmente en los casos en los que la precipitación es frecuente y el dosel está húmedo regularmente. En condiciones de fuerte variación estacional de la disponibilidad de agua en el suelo, la capacidad de los sistemas radicales profundos de los árboles para explotar las reservas de agua de los niveles más profundos del suelo conduce a mayores pérdidas por evaporación.

El impacto de los bosques sobre las inundaciones ha sido durante mucho tiempo fuente de controversia. En muchos de los estudios pioneros, se aplicó una gestión forestal severa talando a gran escala con maquinaria pesada provocando la compactación del suelo, lo que a menudo tuvo como resultado incrementos notables e inmediatos del pico máximo de crecida del caudal. Las prácticas más recientes de gestión forestal buscan proteger el suelo de la compactación y tienen como resultado un efecto mucho me-

### Cuadro 7. Suelos forestales y calidad y cantidad de agua: una síntesis estadounidense de un bosque “natural” ideal.

“Los recursos de agua dulce de mejor calidad y más sostenibles del mundo se originan en los ecosistemas forestales. Las características biológicas, químicas y físicas de los suelos de los bosques son especialmente adecuadas para proporcionar agua de gran calidad a los ríos, moderando su hidrología y proporcionando un hábitat acuático diverso. Los suelos de los bosques proporcionan capas de restos orgánicos, que contribuyen a una micro y macro fauna abundante y diversa. Los sistemas radicales de los bosques son extensos y relativamente profundos comparados con los de los suelos agrícolas y de pastos. Estas condiciones biológicas actúan conjuntamente para crear suelos de gran macroporosidad, baja densidad aparente, y elevadas tasas de infiltración y conductividad hidráulica. Como consecuencia, la escorrentía superficial resulta más bien rara en los medios forestales, y la mayor parte de la precipitación se conduce por el flujo subsuperficial en el que los procesos de absorción y reciclado de los nutrientes y la absorción de contaminantes tienen lugar con rapidez. A causa de la predominancia de los flujos subsuperficiales, los caudales máximos se moderan y los caudales de base se prolongan. La conversión de bosques en cultivos en hileras, pastos o prados supone, casi siempre, el deterioro de la calidad del agua. En Norteamérica la mayor parte de municipios confían en las cuencas hidrológicas para abastecerse de la cantidad adecuada de agua de alta calidad para consumo humano. Resulta especialmente importante en las partes orientales y occidentales del continente en las que las poblaciones humanas son extensas o crecen con rapidez. Los suelos de los bosques proporcionan las condiciones óptimas para generar suministros de agua de alta calidad.” Citado de Neary D.G. et al. 2009.

no drástico sobre la respuesta a la inundación, demostrando que una buena parte del aparente efecto del bosque era debido, de hecho, a las operaciones de corta que dañaban el suelo y a la construcción de pistas forestales. Más aún, muchos estudios eran de corta duración y no incluían las tormentas menos frecuentes pero más intensas. Hoy resulta evidente que la pretensión de que los bosques reducen las inundaciones es cierta principalmente en condiciones de avenidas de intensidad moderada, pero no para los acontecimientos mayores y, por lo tanto, potencialmente más dañinos.

La importancia del tipo de suelo resulta crucial: cuando es permeable y profundo, el impacto de la tala sobre el caudal máximo es, probablemente, mucho menos evidente que en los suelos poco profundos e impermeables. Análogamente, en un suelo que se disgrega fácilmente y resulta erosionable, el hecho de retirar una cubierta forestal protectora puede conducir a un aumento de los picos máximos de las crecidas debido a la pérdida de profundidad del suelo más que a las diferencias entre el bosque y otros tipos de vegetación.

El hecho de que una cubierta terrestre “estable” no sea estacionaria puede poner en duda la validez de usar una cuenca como lugar de referencia para estudios sobre el cambio climático, o que constituya un control válido para comparar los efectos de un cambio de la cubierta del suelo en una cuenca experimental próxima. Se debe tener cuidado al seleccionar las cuencas de referencia.

---

La cubierta y el suelo forestal resultan, en general, beneficiosos para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas generadas en la cuenca hidrológica.

---

Dado que una cubierta forestal limita los procesos erosivos del suelo, las propiedades físicas del agua superficial generada en una cuenca forestada, como la carga de partículas y la turbidez, suelen ser bajas comparadas con otros tipos de cubiertas. Sin embargo, se pueden observar excepciones en caso de lluvias fuertes e intensas o de operaciones forestales drásticas (construcción de carreteras, cortas a hecho).

Las propiedades químicas del agua dependen básicamente del tipo de suelo, las especies de árboles, la química de la lluvia y la deposición atmosférica sobre el dosel así como de los procesos del suelo, incluyendo su meteorización. Se observa con frecuencia que la actividad biológica intensa en la mayoría de los suelos forestales contribuye al proceso de desnitrificación, a pesar de que las talas indiscriminadas pueden inducir, por lo menos temporalmente, un aumento en el contenido de nitratos del agua superficial. La acidez del agua es sólo un problema en suelos desarrollados sobre un material parental ácido (granito, arenisca, rocas metamórficas): se puede agravar por la deposición ácida sobre el dosel y la excesiva exportación de minerales (Ca, Mg) relacionada con los aprovechamientos madereros. En esos casos el pH del agua puede ser muy bajo.

### Lecturas recomendadas

- Calder, I. R. 2007. Forests and water – Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251: 110–120.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N. and Richard, D. 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology* 301(1–4): 235–249.
- Cosandey, C. and Robinson M., 2000. *Hydrologie Continentale*. Armand Colin, Paris. 360 p.
- Lavabre, J. and V. Andréassian, 2000. *Eaux et forêts. La forêt : un outil de gestion des eaux?* [Waters and Forests. Can forest be a water management tool?]. Cemagref, Antony. 147 p.
- Neary, D.G. Ice, .G.G and Jackson, C.R 2009 Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*. doi:10.1016/j.foreco.2009.05.027

# 3.

## Agua verde

“ El agua verde abastece los ecosistemas terrestres y la agricultura de secano a través de la humedad del suelo y también es agua verde la que se evapora de las plantas y las superficies acuáticas a la atmósfera en forma de vapor de agua.” (UNESCO 2006). Esta definición, ampliamente aceptada, capta la esencia hidrológica del fenómeno natural. También pone en evidencia las conexiones con otros sistemas naturales de la biosfera: paisajes alterados (ya sea naturalmente o por la mano del hombre) y ecosistemas terrestres.

Puesto que los flujos relacionados con la intercepción del agua de lluvia y con la evaporación del suelo ya han sido descritos en la sección 1.4., este capítulo se centrará en los aspectos del agua verde asociados al agua en los árboles y en los bosques, y en cómo estos procesos influyen en las funciones de los ecosistemas y los servicios ecosistémicos derivados. Está estructurado en tres secciones:

- 3.1 El agua verde para mantener los ecosistemas forestales y sus funciones.
- 3.2 Los procesos del agua en los árboles: asimilación de agua y transpiración y fotosíntesis.
- 3.3 Cómo las especies vegetales hacen frente al estrés hídrico.



**Figura 32.** Se cree que las nubes vespertinas sobre el bosque tropical del Amazonas en la estación seca son el resultado de un aumento de la transpiración (19 de agosto de 2009). Fuente: NASA.

Las nubes se formaron muy probablemente a partir del vapor de agua que envía a la atmósfera la transpiración de los árboles asociada a la fotosíntesis a lo largo del día. Durante la estación seca la selva recibe más luz solar. Las plantas crecen, agregando hojas extras y aumentando la fotosíntesis. Hacia el medio día el aire asciende y se acaba condensando en nubes como las de la imagen. Resulta fácil darse cuenta de que no hay nubes sobre el río sino que están distribuidas por el bosque por las siguientes razones: en general, la tierra se calienta más rápido que el agua y desprende más calor durante el día. El aire caliente se eleva desde el suelo arrastrando el agua evapotranspirada con él. Este aire se enfría al ascender y el vapor de agua se condensa en las minúsculas nubes que podemos ver en la imagen. Pero todo lo que sube, baja. En este caso la masa de aire descende sobre los ríos, donde las temperaturas son más frías. El aire, al descender, se calienta, lo que evita que el vapor se condense y forme nubes. Fuente: Holli Riebek.

### Lecturas recomendadas

- Agaponova, O. 2007. Exploring the Concept of Green Water. Bridging Science and Water Resources Management M.Sc. Thesis - Lund University. 48 p. [www.lumes.lu.se](http://www.lumes.lu.se)



## 3.1.

# El agua verde para mantener los procesos de los ecosistemas forestales y sus funciones

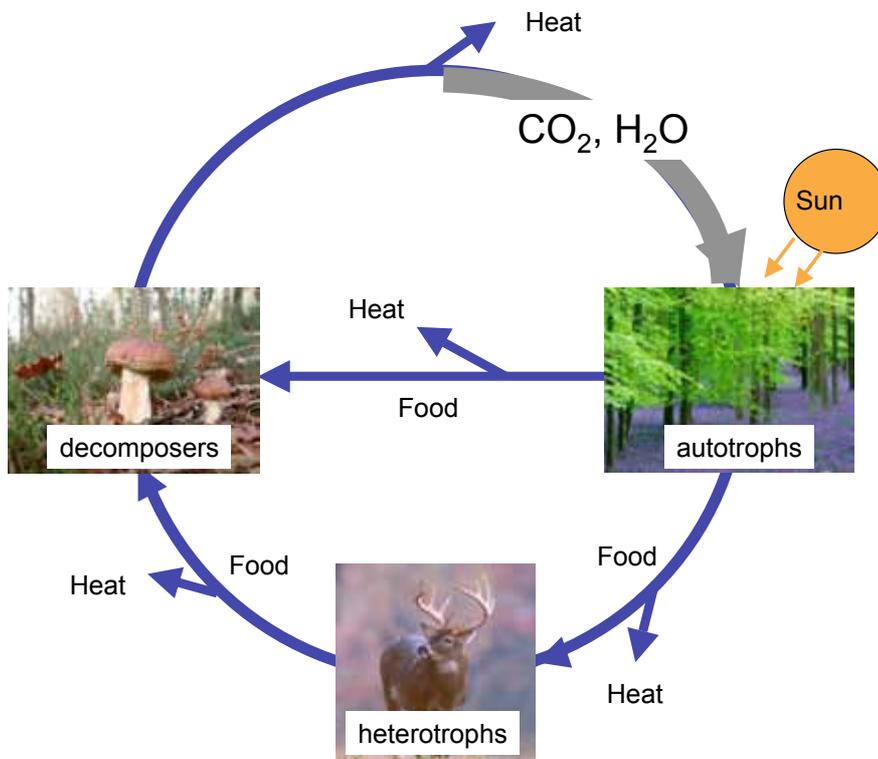
Yves Birot y Ramón Vallejo

---

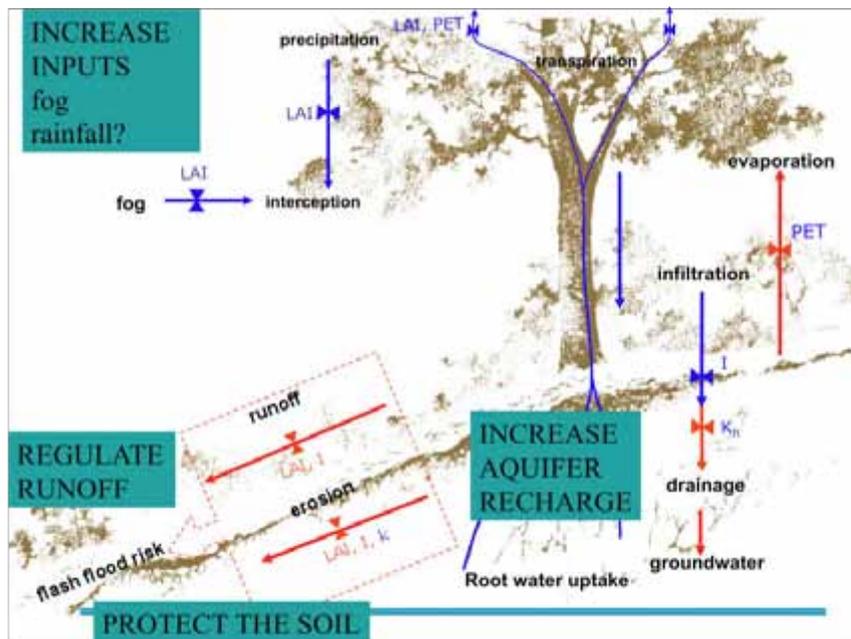
Las aguas verdes son necesarias no sólo para sustentar la biología y la vida de los árboles, sino para mantener funcionales todos los grupos que forman la biodiversidad del bosque (microorganismos, insectos, animales, plantas) que participan en los procesos básicos de los ecosistemas. A pesar de que la fisiología de la fotosíntesis consume poca agua, las plantas terrestres necesitan transpirar grandes cantidades para transportar los nutrientes hasta las copas y para el intercambio gaseoso. El agua es también esencial para la circulación de elementos químicos a través del ecosistema.

---

**T**ras la belleza de un paisaje forestal, la dinámica del ecosistema funciona en una serie de procesos interrelacionados y continuos que tienen que ver con: I) la entrada de energía, II) la circulación de elementos esenciales para la vida (nitrógeno, carbono, nutrientes minerales, etc.), y III) la circulación del agua. A pesar de que los árboles constituyen la piedra angular de los bosques, muchas otras comunidades y poblaciones de plantas, animales y microorganismos (superficiales y subterráneas) son también parte integral de este ecosistema e interaccionan entre sí y con su entorno físico. Para mantener sus funciones vitales y su crecimiento, todos los organismos vivos necesitan una entrada de energía. Al contrario de los elementos, que se reciclan, la energía debe ser renovada constantemente. La única entrada posible de la energía a un ecosistema son las plantas. En las plantas, la **fotosíntesis** convierte alrededor de un 3% de la luz incidente –el resto (97%) se disipa en forma de calor-, constituyendo la base de la formación de biomasa (ver sección 3.3). Las plantas se denominan **productores** o **autótrofos**, y los animales, insectos y microorganismos que las pueden consumir directa o indirectamente (Figura 33), se denominan **heterótrofos**. En un extremo de la cadena alimentaria se encuentran los **descomponedores** (microorganismos que cortan, digieren y metabolizan desechos orgánicos tales como frutas caídas, madera muerta, detritos y animales muertos). Estos tres grupos –**productores**, **consumidores** y **descomponedores** – necesitan agua como elemento básico de sus tejidos (compuestos de un 70–90% de agua) y resulta indispensable para su funcionamiento y para la fotosíntesis (productores). Todos y cada uno de los organismos vivos que residen en un ecosistema dependen totalmente de los procesos fotosintéticos que se llevan a cabo por las plantas y, por tan-



**Figura 33.** Principios básicos del funcionamiento de un ecosistema. Fuente: Servicio Forestal de Canadá. <http://ecosys.cfl.scf.rncan.gc.ca/dynamique-dynamic/dynamique-dynamic-eng.asp>



**Figura 34.** Papel de la cubierta forestal en la regulación del agua. LAI índice de área foliar; PET evapotranspiración potencial, I infiltración, k coeficiente de permeabilidad.

to, gracias al agua. El vigor de sus plantas se refleja en el dinamismo de un ecosistema.

En general, la cantidad de agua almacenada en los organismos es una parte muy pequeña, aunque crítica, de la cantidad de agua que circula en el ecosistema y que permite los procesos vitales, especialmente la fotosíntesis. En un día de sol y calor, una hoja puede renovar todo su contenido de agua en una hora, y una planta transpira unas 100 veces su peso fresco a lo largo de su vida. A pesar de que sólo un porcentaje muy pequeño del agua transpirada por las plantas se usa directamente para el proceso fotosintético, las plantas terrestres necesitan consumir ingentes cantidades de agua que demanda la atmósfera para permitir el inevitable compromiso entre fijación de CO<sub>2</sub> y transpiración de agua a través de los estomas. El agua almacenada en los árboles de los bosques puede llegar a sumar unos cientos de toneladas por hectárea (algunas decenas de mm). Por ejemplo, el pino carrasco en uno de los suelos forestales más secos de Europa (clima semiárido, precipitación anual de 270 mm) contiene unos 15 mm de agua en su biomasa en comparación con los 50 contenidos en el suelo (promedios anuales). El agua almacenada en los árboles fluctúa ligeramente a lo largo del año, y el agua que contiene la albura puede proveer las demandas de transpiración durante cortos períodos de sequía que pueden durar varios días, especialmente en coníferas. En algunas condiciones áridas, el contenido de agua de la planta puede llegar a ser muy significativo (cactus, árbol fuente o garoé (El Hierro, Islas Canarias)) especialmente para proveer del agua tan escasa a los organismos e incluso a los humanos.

**Tabla 4.** Clasificación de las funciones, bienes y servicios del ecosistema. **Negrita:** relación directa con el agua, *cursiva:* relación indirecta con el agua. Fuente: de Groot et al., 2002.

<p>1. Funciones de regulación y otros servicios relacionados de los ecosistemas. Este grupo de funciones se refiere a la capacidad de los ecosistemas para regular los procesos biológicos esenciales y los sistemas que sustentan la vida por medio de ciclos biogeoquímicos y otros procesos biosféricos. Además de mantener la salud del ecosistema (y de la biosfera), estas funciones de regulación aportan muchos servicios que tienen beneficios directos e indirectos en las sociedades humanas (p.ej. aire limpio, agua, suelo y servicios de control biológico).</p>	<p>1.1. Regulación gaseosa (<b>absorción de C</b>)  <i>1.2. Regulación del clima</i>  1.3. Filtrado de la polución del aire  <i>1.4. Prevención de perturbaciones</i>  <b>1.5. Regulación del agua</b>  <b>1.6. Provisión de agua</b>  <b>1.7. Conservación del suelo</b>  <b>1.8. Formación del suelo</b>  <b>1.9. Reciclado de los nutrientes</b>  1.10. Tratamiento de los residuos  1.11. Polinización  1.12 Control biológico</p>
<p>2. Funciones de hábitat y servicios relacionados de los ecosistemas. Los ecosistemas proveen de refugio y hábitat reproductivo a plantas y animales silvestres y por lo tanto contribuyen a la conservación in situ de la diversidad biológica y genética y al proceso evolutivo.</p>	<p>2.1. Función de refugio  2.2. Función de “vivero”</p>
<p>3. Funciones de producción de los ecosistemas y bienes y servicios relacionados. La fotosíntesis y la asimilación de nutrientes por parte de los autótrofos convierte la energía, el dióxido de carbono, el agua y los nutrientes en una amplia variedad de estructuras bioquímicas, que usan los consumidores para crear una variedad aún más amplia de biomasa viva. Esta gran diversidad de estructuras bioquímicas que brindan muchos ecosistemas proporcionan bienes para las necesidades humanas, desde comida y materias primas hasta recursos energéticos y material genético.a</p>	<p><i>3.1. Alimento</i>  <i>3.2. Materias primas</i>  <i>3.3. Recursos genéticos</i>  <i>3.4. Recursos medicinales</i>  3.5. Recursos ornamentales</p>
<p>4. Funciones de información y bienes y servicios relacionados. Al tiempo que las sociedades modernas tienden a estar más y más urbanizadas, los ecosistemas naturales proveen una “función de referencia” esencial y contribuyen al mantenimiento de la salud humana y a su bienestar al dar una oportunidad para la reflexión, el enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, el recreo y la experiencia estética.</p>	<p>4.1. Información estética  4.2. Recreo y (eco)turismo  4.3. Inspiración cultural y artística  4.4. Información espiritual e histórica  4.5. Información científica y educacional</p>

A través de su ciclo, el agua es también uno de los **principales transportadores de elementos químicos y nutrientes** en el ecosistema –actuando tanto como medio de transporte como de disolvente. Al hablar de nutrientes nos referimos a las sustancias orgánicas o minerales (elementos o compuesto químicos) que plantas y animales necesitan para un crecimiento y actividad normales. Las plantas, incluidos los árboles, obtienen los nutrientes básicamente del suelo absorbiéndolos a través de las raíces, a menudo en simbiosis con los hongos formadores de micorrizas.

La composición química del agua de lluvia está influenciada por factores naturales (el viento con arena del Sáhara que cruza el Mediterráneo) y antropogénicos (agricultura, industria y transporte) que ilustran conocidos ejemplos (lluvia ácida, deposiciones de nitrógeno, etc.). También se pueden dar otras modificaciones químicas del agua relacionadas con el flujo cortical (el agua captada por las copas que desciende por la corteza del tronco) y el agua que atraviesa las copas. Al atravesar el suelo, la química del agua se ve influenciada por las características orgánicas y minerales del suelo. El flujo del agua es un camino importantísimo para el reciclado de los nutrientes en los bosques, a pesar de que el flujo de nutrientes en comparación con el flujo de agua depende en gran medida de las características específicas de cada nutriente en términos de su mecanismo de absorción de las raíces y su interacción con la matriz del suelo. El flujo de agua es un componente crítico de la meteorización de las rocas y de la formación del suelo, especialmente en bosques en los que elevada actividad microbiana y bioquímica mejoran la capacidad meteorizadora del agua. La calidad del agua azul también se relaciona con estos procesos.

---

Observar los procesos que tienen lugar en los ecosistemas naturales – que dependen en gran medida del agua– ayuda a entender sus efectos sobre las funciones de los ecosistemas y, a su vez, los servicios relacionados con los mismos. Puesto que el agua es, muy a menudo, un factor limitante en los ecosistemas forestales del Mediterráneo, la escasez de agua puede dar como resultado una marcada alteración de las funciones del ecosistema y tener un impacto negativo en la provisión de bienes y servicios para las sociedades humanas.

---

Una función del ecosistema es la capacidad de los procesos y componentes naturales para proveer bienes y servicios que satisfagan –directa o indirectamente– las necesidades humanas. Según esta definición, las funciones de los ecosistemas se pueden ver como un subconjunto de los procesos ecológicos y de la estructura de los ecosistemas. Cada función es el resultado del proceso natural del total de todos sus subsistemas ecológicos de los que forma parte. Los procesos naturales, a su vez, son el resultado de complejas interacciones entre los componentes bióticos (organismos vivos) y abióticos (químicos y físicos) de los ecosistemas sometidos a las leyes que regulan la materia y la energía. Las funciones de los ecosistemas se pueden clasificar (Tabla 4) en cuatro grupos: I) funciones de regulación II) funciones de hábitat, III) funciones de reproducción, y IV) funciones de información. Esta agrupación, válida para todos los ecosistemas, se adapta especialmente bien al caso de los bosques.

La Tabla 4 proporciona una perspectiva de cómo la disponibilidad de agua puede influenciar las funciones de un ecosistema, y los bienes y servicios que proporciona.

El enfoque de las funciones del ecosistema nos permite una visión holística de los bienes y servicios que proporciona. Centrarse en los servicios basados en los ecosistemas permite relacionarlos con sus características. En el caso de los ecosistemas forestales mediterráneos – ya de por sí sujetos a un déficit recurrente de agua– una imprudente separación que favoreciese en exceso el agua azul tendría impactos muy evidentes sobre las sociedades, ya que altera los bienes y servicios ecosistémicos.

Uno de los servicios más importantes del agua verde se da a través del papel de los bosques al capturar agua azul, regulando flujos y haciendo circular el agua (Figura 34). Este es un mecanismo biológico crítico en la regulación del ciclo del agua y en el uso de la misma para la producción biológica: un recorrido del agua forestal genera productividad, al contrario del recorrido del agua en un entorno deforestado que, en muchos casos, especialmente en las regiones áridas del Mediterráneo, favorece la erosión, la degradación de la tierra, las inundaciones y provoca daños a los seres humanos y a los ecosistemas. La evaporación del agua desde el suelo desnudo no contribuye a la producción biológica, sino sólo a los procesos físicos que tienen lugar en la superficie del suelo.

El crecimiento del bosque, sustentado por el agua verde, es uno de los mecanismos relevantes que se reconoce para mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono atmosférico (Convenio Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). Este servicio se puede mejorar reduciendo la deforestación (especialmente en las pluvissilvas tropicales), aumentando la aforestación y las prácticas de gestión forestal sostenibles sujetas a la disponibilidad de agua.

---

**El agua verde resulta necesaria para mantener el funcionamiento de los ecosistemas, sus funciones y los bienes y servicios que proporcionan.**

---

Tanto los ecosistemas como los seres humanos dependemos del agua. La cuestión de cómo proveer suficiente agua verde para sostener los ecosistemas y, al mismo tiempo, proveer a la sociedad de agua azul se discute en el Capítulo 4.

### Lecturas recomendadas

- Groot De R. S., Wilson M.A. and Boumans R.M.J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives. *Ecological Economics* 41: 393 – 408
- Nabuurs, G.-J., Thürig, E., Heidema, N., Armolaitis, K., Biber, P., Cienciala, E., Kaufman, E., Mäkipää, R., Nilsen, P., Petrisch, R., Pristova, R., Rock, J., Schelhaas, M.J., Sievanen, R., Somogyi, Z. and Vallet, P. 2008. Hotspots of the European forest carbon cycle. *Forest Ecology and Management* 256: 194–200.
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. and M. Engwall. 1999. Linkages among water vapour flows, food production and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology* 3(2): 5. <http://www.consecol.org/vol3/iss2/art5/>

## 3.2.

# Los procesos del agua en los árboles: transpiración y fotosíntesis

Santiago Sabaté y Carlos A. Gracia

Las plantas absorben el agua a través de sus raíces finas, la almacenan e diferentes componentes de la biomasa y la pierden en forma de vapor a través de los estomas (transpiración). Mientras los estomas están abiertos y tiene lugar la transpiración, las plantas obtienen dióxido de carbono de la atmósfera que usarán para la fotosíntesis. El porcentaje entre el carbono ganado y el agua perdida en el proceso de la transpiración a través de los estomas de la planta se utiliza como una medida de la eficiencia del uso del agua, que puede ser instantánea cuando se obtiene midiendo el intercambio gaseoso o más integradora cuando se calculan períodos de tiempo más largos y se estima a través de análisis isotópicos u otros métodos indirectos.

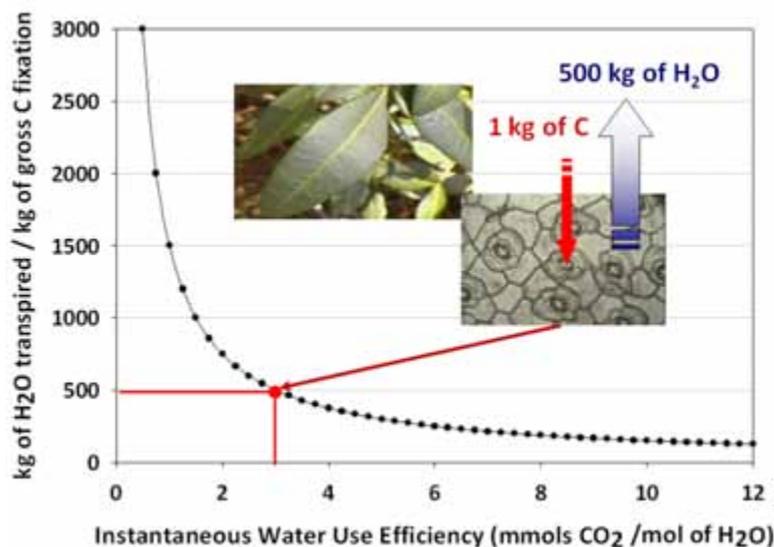
El carbono es el principal componente del esqueleto de la biomasa planta y representa casi la mitad de su masa. El carbono tiene una vida larga en los tejidos de las plantas, mientras que el agua no, ya que atraviesa la planta desde el suelo hasta la atmósfera impulsada por el proceso de transpiración. El agua almacenada en los tejidos de una planta y el agua que toma parte en los procesos de fotosíntesis y respiración es muy poca comparada con la que participa en la transpiración. Así que la absorción de carbono es un proceso muy caro en términos de agua. La Figura 35 representa la relación entre la eficiencia del uso de agua instantánea y los kilos de agua (o litros) transpirados por cada kilo de carbono fijado en la fotosíntesis. La eficiencia del uso del agua instantánea se obtiene fácilmente midiendo el intercambio gaseoso.

---

La gran cantidad de agua transpirada para fijar el carbono es significativa. En el caso del *Quercus ilex*, son normales valores de 3–5 (mmoles  $\text{CO}_2$  /mol de  $\text{H}_2\text{O}$ ). Una vez descontado el carbono que retorna a la atmósfera por la respiración, **fijar un gramo de carbono puede tener un coste de 1.000 a 1.500 gramos de agua.**

---

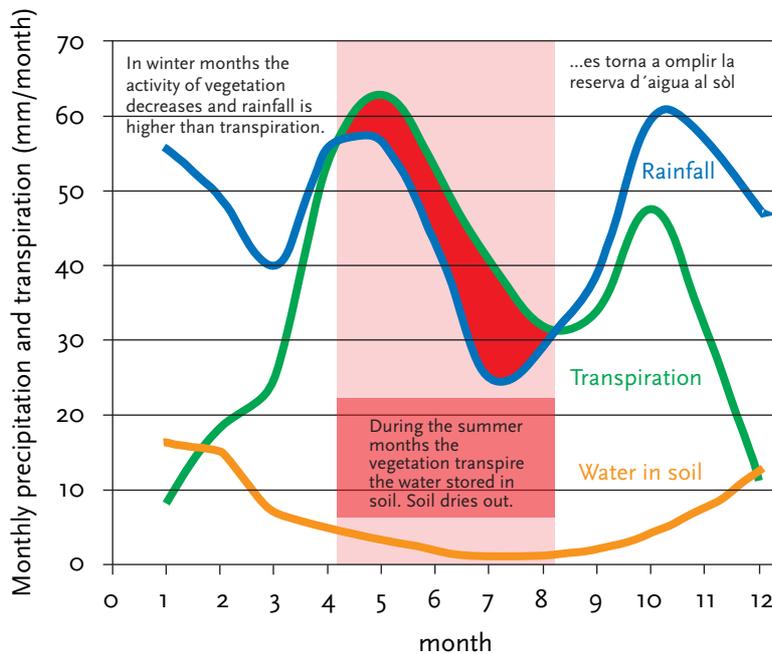
Los valores normales al medir la eficiencia del uso del agua instantánea en las plantas pueden variar entre 2 y 8 (mmoles  $\text{CO}_2$  /mol de  $\text{H}_2\text{O}$ ). En el caso de *Quercus ilex*, valores de entre 3 y 5 (mmoles  $\text{CO}_2$  /mol de  $\text{H}_2\text{O}$ ) resultan típicos. Este valor implica que se transpiran entre 300 y 500 kg. de agua por cada kilo de carbono fijado por la fotosíntesis. Una fracción importante de este carbono (un 60%) vuela a la atmósfera con la res-



**Figura 35.** Cantidad de agua transpirada por las plantas en función de la eficiencia instantánea del uso de agua. La mayoría de las plantas mediterráneas tienen una eficiencia en el uso del agua de alrededor de 3 mmol CO<sub>2</sub> / mol de H<sub>2</sub>O, (punto rojo). En estas condiciones, el coste de asimilar 1 g. de carbono es de 500 g de agua. Una vez descontado el carbono que vuelve a la atmósfera a través de la respiración, un gramo de carbono almacenado en la planta como producción primaria neta (PPN), puede tener un coste de entre 1.000 a 1.500 gramos de agua.

piración, reduciendo así hasta un tercio de la eficiencia del uso del agua en relación con la fijación neta del carbono. En general, se puede decir que la pérdida de vapor de agua de la planta a través de los estomas es más de 1.000 veces superior a la ganancia neta de carbono. La fijación de carbono está íntimamente relacionada con la transpiración, especialmente en las plantas C<sub>3</sub>. Pero ¿cuánta transpiración es posible? La cantidad total de agua transpirada por los bosques está relacionada con dos importantes restricciones medioambientales. La primera es, obviamente, la cantidad de agua disponible para las plantas. La segunda es la cantidad total de energía disponible para la evaporación, lo que nos da la transpiración potencial desde las superficies de las hojas de los árboles. Cuanto mayor sea el número de árboles que tienen agua disponible, mayor será la cantidad de agua que se transpirará— pero sólo hasta cierto límite impuesto por la demanda evaporativa del aire, es decir, la energía disponible para la evaporación.

Dependiendo de la localización del bosque se pueden encontrar tanto bosques limitados por la energía disponible como bosques limitados por el agua. Es más, se pueden dar limitaciones de agua y de energía en el mismo bosque dependiendo de la estación. En el Mediterráneo, por ejemplo, está claro que los bosques están limitados por el agua en los períodos estivales, y por el contrario, en el periodo invernal se ven limitados por la energía disponible. Las mejores condiciones de crecimiento se dan en primavera y otoño. El agua almacenada en el suelo juega un papel importante amortiguando las limitaciones hídricas a las que se ven sometidas las plantas en verano. La Figura 36 muestra el patrón anual de agua en el suelo, evapotranspiración y precipitación en un bosque *Quercus ilex* (encina) en Prades, (noreste de España). Se estima que el contenido de agua del suelo de este bosque varía entre 96 a 0,2 mm dependiendo de la profundidad del suelo y la estación del año.



**Figura 36.** Variación anual de agua en el suelo, evapotranspiración y precipitación en el bosque de *Quercus ilex* (encina) en Prades. Se estima que el contenido de agua del suelo de este bosque varía entre 96 y 0,2 mm dependiendo de la profundidad del suelo y la estación del año.

En el Mediterráneo la mayoría de los bosques tienen limitaciones de agua en períodos estivales y de energía en los períodos invernales.

Cuando las plantas se ven limitadas por el agua controlan su pérdida a través de diferentes mecanismos. La respuesta más rápida consiste en cerrar los estomas, lo que reduce las pérdidas pero al mismo tiempo reduce la absorción de carbono. Con este mecanismo las plantas solucionan, a corto plazo, el problema de la deshidratación continua de los tejidos. Es relevante el papel de las acuaporinas en el control de las pérdidas de agua como respuesta a las variaciones en la disponibilidad de agua del suelo.

Las acuaporinas son proteínas que controlan el transporte de agua en la membrana plasmática, cuyos canales se pueden cerrar en caso de sequía, lo que demuestra la importancia de este mecanismo celular como respuesta al suministro de agua.

Las proteínas denominadas acuaporinas facilitan el movimiento del agua a través de las membranas celulares. Estas proteínas pertenecen a la principal familia de proteínas intrínsecas, cuyos miembros se encuentran en la mayoría de los organismos vivos.

La reducción de la fotosíntesis origina problemas a las plantas si no hay suficientes reservas de carbono almacenadas para mantener sus requerimientos de respiración. Ade-

más, la falta de agua puede limitar el funcionamiento del transporte del floema y la retranslocación del carbono a larga distancia en los árboles. Se pueden dar otros problemas como una temperatura excesiva de las hojas, provocada por la reducción de la transpiración, o una excesiva radiación que puede causar daño a los fotosistemas del cloroplasto. Cuando la limitación del agua se prolonga, se dan las respuestas a medio plazo, como la caída de hojas. Las respuestas a largo plazo incluyen ajustar la forma del individuo o las características de sus tejidos.

---

**La respuesta más rápida de las plantas para controlar la pérdida de agua es cerrar los estomas, lo que reduce su conductancia al agua, pero al mismo tiempo reduce la ganancia de carbono.**

---

Dada la plasticidad de ciertas especies de plantas, se pueden encontrar diferentes rasgos entre individuos relacionados con las estructuras de hojas y madera, así como en las relaciones raíz/tallo. Es más, diferentes especies pueden presentar diferentes capacidades y estrategias como respuesta a la sequía.

Una amplia clasificación de las categorías de respuesta de las plantas a la disponibilidad de agua en el suelo se basa en cómo la hidratación del tejido de las plantas se mantiene estable bajo condiciones medioambientales fluctuantes. La isohídria se atribuye al fuerte control estomático de la transpiración, que tiene como resultado un potencial hídrico de la hoja al mediodía similar en plantas bien regadas y en aquellas que sufren sequía. Las plantas anisohídricas suelen tener menor sensibilidad estomática a la demanda evaporativa y a la humedad del suelo, permitiendo una mayor fluctuación en el potencial hídrico de la hoja al mediodía. Un tercer tipo de respuesta es el de las plantas isohidrodinámicas, cuyo control estomático es tan fuerte que mantienen los gradientes de potencial hídrico internos relativamente constantes, pero al mismo tiempo permiten que el potencial hídrico de la hoja al mediodía fluctúe muchísimo dependiendo de la estación en sincronía con el potencial de agua del suelo.

Como ya se ha mencionado, la cantidad de agua almacenada en las plantas y la cantidad usada en la fotosíntesis es, de lejos, menor que la cantidad de agua transpirada. Por ejemplo, en el caso del bosque de *Quercus ilex* (encina) de Prades anteriormente mencionado, se ha estimado la cantidad de agua transpirada en 463 mm/año de media, mientras que el agua libre en los tejidos de los árboles está entre los 11 y los 17 mm. Es más, en el mismo bosque, a partir de la producción primaria bruta y la respiración de las plantas, la cantidad de agua usada en la fotosíntesis, como aceptor de electrones para reducir el carbono, se estima en unos 2,3 mm/año y el agua producida por la respiración unos 1,2 mm/año. Estos valores sirven para mostrar las diferentes magnitudes de agua usada en los bosques mediterráneos, subrayando la importancia de la transpiración.

### Lecturas recomendadas

- Adams, H.D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, B.A., Villegasa, J.C., Breshears, D.B., Zoug, C.B., Troch, P.A. and Huxman, T.E. 2009. Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global change-type drought. *Proc Natl Acad Sci USA* 106: 7063–7066.
- Franks, P., Drake, P.L. and Froend, R.H. 2007. Anisohydric but isohydrodynamic: seasonally constant plant water potential gradient explained by a stomatal control mechanism incorporating variable plant hydraulic conductance. *Plant Cell and Environment* 30: 19–30.
- Heinen, R.B., Ye Q. and Chaumont, F. 2009. Role of aquaporins in leaf physiology. *Journal of Experimental Botany* 60(11): 2971–2985.
- Jackson, R.B., Sperry J.S. and Dawson T.E. 2000. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science* Vol. 5(11): 482–488.
- Lawlor, D.W. and Cornic, G. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment* 25: 275–294.

## 3.3.

## Cómo combaten el estrés hídrico las plantas

Oliver Brendel y Hervé Cochard

**L**a falta de agua conduce a las plantas a una situación de estrés. En este capítulo se discuten las adaptaciones al déficit de agua en el suelo. Resulta necesaria una cantidad suficiente de agua en el suelo para la supervivencia de la planta, puesto que el mantenimiento del flujo de agua de las raíces a las hojas asegura la suficiente turgencia de las células para su crecimiento, el reciclado de los nutrientes y la apertura de los estomas para permitir el intercambio gaseoso.

---

Las plantas han desarrollado varias estrategias, a diferentes escalas temporales, para sobrellevar la reducción de disponibilidad de agua del suelo: ajustes fenológicos, control del estado hídrico, características morfológicas y anatómicas que pueden variar entre y dentro de cada especie.

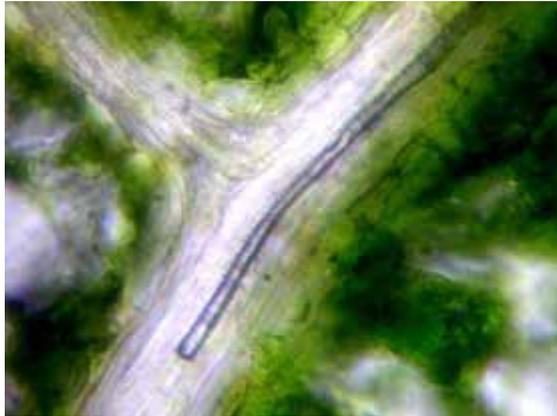
---

Las plantas herbáceas pueden **salvar los** períodos de disponibilidad reducida de agua durante el ciclo anual, completando el ciclo de crecimiento - floración - producción de semillas de semillas totalmente antes del inicio del período de sequía. Las plantas perennes y leñosas, como los árboles, no pueden escapar completamente de los períodos de sequía, pero el ajuste de la brotación de las yemas, el desarrollo de la hoja y su caída inducidas por la sequía pueden limitar el impacto de la misma en el ciclo de crecimiento, como se ve en las diferentes especies de robles mediterráneos caducifolios y perennes.

La **resistencia a la sequía** de los árboles es, básicamente, una cuestión de supervivencia y competencia dentro del ecosistema. En silvicultura, sin embargo, es también una cuestión de mantenimiento del crecimiento. Las estrategias de resistencia a la sequía se pueden agrupar en mecanismos de **evitación** y **tolerancia**, pudiendo dividirse los mecanismos de tolerancia en **evitación de la deshidratación** y **tolerancia a la deshidratación**.

Mantener una hidratación suficiente de los tejidos es una estrategia con la que se **evita** el estrés por sequía, y se puede cuantificar midiendo el potencial hídrico de los tejidos. El cierre de los estomas al inicio de la sequía, conservará el agua en la planta protegiéndola; sin embargo, la productividad desciende puesto que limita la entrada de carbono a la planta.

Otra estrategia es **tolerar** el descenso del potencial hídrico del tejido. Los estomas se mantienen abiertos y, por tanto, no disminuye la productividad. Las plantas lo consiguen aumentando **la tolerancia a la deshidratación** por ajuste osmótico en las células, modificando las propiedades anatómicas relacionadas con la conducción del agua (es



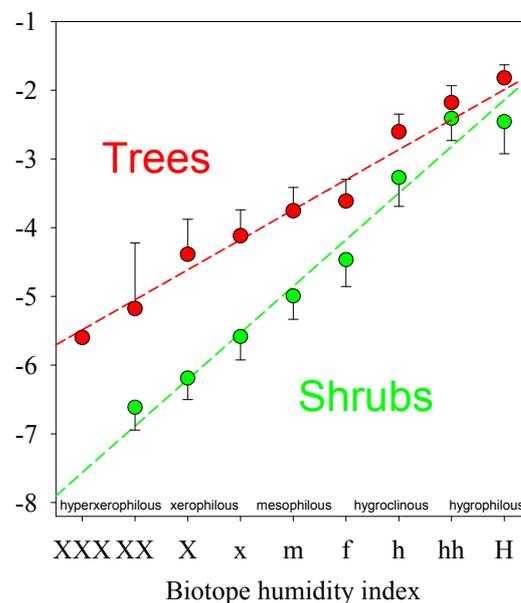
**Figura 37.** Burbuja de agua atrapada en un vaso del xilema del nervio de una hoja de árbol. Durante el estrés hídrico, la tensión de la savia del xilema aumenta y se puede llegar a cavitarse. Esto provoca la entrada de aire en los conductos del xilema lo que interrumpe el suministro de agua a las hojas y puede acabar matando a la planta por desecación. Las especies de árboles mediterráneos son mucho más resistentes a la cavitación que otras especies, lo que explica en parte como pueden tolerar mejor el estrés hídrico intenso. Foto: H. Couhard.

decir: pérdida de conductividad) lo que permite una mayor tensión en la columna de agua o aumentando la **evitación de la deshidratación**, por ejemplo reduciendo la superficie total de la hoja, la densidad estomática, aumentando el grosor de la hoja, de la cutícula foliar y la esclerofilia de las hojas, aumentando la fracción de masa que se localiza bajo el suelo (la proporción raíz /tallo) y aumentando asimismo la profundidad radical.

Mientras que algunas de estas estrategias necesitan tiempo para desarrollarse, especialmente los ajustes morfológicos y anatómicos, otras estrategias conllevan respuestas rápidas. Algunas de las respuestas más rápidas de las plantas para aclimatarse al déficit de agua en el suelo la constituyen el cierre de los estomas y los ajustes osmóticos. A estas respuestas les siguen **ajustes morfológicos** como un aumento del crecimiento de las raíces, y para las plantas de crecimiento continuo, cambios en la morfología del tallo y de la hoja. La exploración de la humedad disponible en el suelo es especialmente relevante para las plantas mediterráneas y se dan importantes diferencias entre especies. Por ejemplo, se ha demostrado que *Quercus ilex* tiene un sistema radical más profundo que *Q. suber*, y que *Q. ilex* mantiene un crecimiento radical durante la sequía comparado con *Q. cerris* y *Q. frainetto*. También se ha informado de diferencias significativas en la biomasa de las raíces de cuatro tipos diferentes de especies de pinos mediterráneos con diferentes grados de tolerancia. Sin embargo, las diferencias no sólo se dan entre especies diferentes, sino también dentro de una especie en la que las variantes genéticas pueden tener como resultado una diversidad de respuestas. Por ejemplo, las significativas diferencias entre la distribución de la biomasa de las raíces comparadas con la biomasa aérea entre variedades de *Pinus pinaster* y entre los ecotipos de diferentes procedencias de *Cedrus libani*, en los que las poblaciones originarias de lugares más secos presentan sistemas radicales mayores.

A continuación, intentaremos clarificar dos rasgos especialmente interesantes: las diferencias en la susceptibilidad al embolismo de los conductos de agua de diferentes especies durante el estrés causado por la sequía y las diferencias en la eficiencia del uso del agua entre especies.

**Figura 38.** Correlación entre la vulnerabilidad del xilema a la cavitación de casi cien especies leñosas de la flora francesa y el índice de humedad de su hábitat. La resistencia de las especies a la cavitación se estima por la presión del xilema que provoca el 50% de la cavitación ( $P_{50}$ , MPa). El índice de humedad del biotopo es de Rameau et al. (1989, 1993, 2008). Las especies de los hábitats secos son, definitivamente, mucho más resistentes a la cavitación. En un mismo hábitat, los arbustos son más resistentes a la cavitación que los árboles, lo que probablemente refleja un sistema radical más superficial en los primeros.



En condiciones de estrés hídrico pronunciado, se puede producir un **embolismo en los vasos conductores** – impidiendo que la savia ascienda del suelo a las hojas– que puede acabar en la desecación y muerte de la rama o del árbol. Los umbrales de presión crítica del xilema relacionados con el embolismo varían muchísimo entre especies, estando las mediterráneas entre las más resistentes a la sequía.

Como se ha indicado anteriormente, la savia está en los conductos del xilema bajo una enorme presión negativa (=tensión). El agua es físicamente metaestable en estas condiciones, y puede cambiar a una fase gaseosa más estable por medio de la **cavitación**. La cavitación, a su vez, provoca un **embolismo**, es decir rompe la integridad de las columnas de agua en los conductos del xilema (Figura 37) y altera así los mecanismos que permiten que la savia ascienda desde el suelo hasta las hojas. Las consecuencias fisiológicas de la cavitación son muy significativas puesto que pueden llegar a provocar la muerte de los árboles por desecación. Esto explica el motivo por el que se han dedicado tantos esfuerzos en las últimas tres décadas a la caracterización y entendimiento de la cavitación en los árboles. Estos estudios muestran claramente que la cavitación sólo se desarrolla cuando la presión del xilema desciende por debajo del valor crítico  $P_{cav}$ .  $P_{cav}$  es, probablemente, uno de los parámetros fisiológicos más variables entre las especies de árboles.

Las especies más vulnerables (como *Salix* o *Populus*) tienen valores de  $P_{cav}$  de hasta -1,5 MPa. En contraste, las especies más resistentes a la cavitación (como *Cupressus* o *Callitris*) tienen valores de  $P_{cav}$  por debajo de -10 MPa. Unos rangos tan grandes tienen profundas implicaciones en las relaciones hídricas de las especies y sus respuestas al estrés hídrico. Los conductos de xilema de las especies con  $P_{cav}$  altos son intrínsecamente incapaces de soportar niveles elevados de estrés hídrico. Por lo tanto, estas especies tienen que cerrar sus estomas pronto durante una sequía para evitar embolismos que pueden resultar fatales y son, por tanto **evitadores de la sequía**. En contraste, las especies con  $P_{cav}$  bajo pueden tolerar la presencia de un estrés hídrico más intenso y

### Cuadro 8. Investigación sobre los rasgos asociados a la adaptación a la sequía: algunos resultados.

Los rasgos asociados a la adaptación a la sequía se estudiaron en ensayos con poblaciones de procedencia diversa de la mayoría de las principales especies de árboles de los bosques mediterráneos (p.ej. *Pinus halepensis*, *Pinus brutia*, *Pinus pinaster*, *Pinus nigra*, *Pinus canariensis*, *Pinus pinea*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Cedrus libani*) tomando en consideración el crecimiento, la supervivencia, la biomasa de diferentes compartimentos, la anatomía de la madera relacionada con elementos conductores, eficiencia en el uso del agua, conductancia y densidad de los estomas, asimilación del CO<sub>2</sub>, estado hídrico de la planta, ajuste osmótico de la hoja, estatus antioxidante, conductividad hidráulica y pérdida de conductividad. Algunas veces, la medida de los rasgos para una condición medioambiental no son suficientes para caracterizar diferencias en las poblaciones, a pesar de que cuando se calcula un índice de plasticidad para diferentes entornos se pueden determinar esas diferencias. Este es el caso del *Pinus halepensis*, en el que las plántulas de una garriga mostraban una plasticidad significativamente mayor comparadas con las que habían crecido en un suelo rocoso. Sin embargo, este no es caso de *Quercus coccifera*.

También se estudió la variación genética usando marcadores genéticos: un estudio en *Castanea sativa* detectó un patrón geográfico vinculado a la precipitación. En el caso de *Pinus pinaster*, *P. nigra* y *P. uncinata* la diversidad genética intrapoblacional se relacionó con la precipitación estival.

tienden a ser más **tolerantes a la sequía**. En ambos casos se observa una notable coordinación entre las funciones del xilema y del estoma: los estomas se cierran para controlar la presión del xilema, permitiendo mantener sus valores ligeramente por encima de  $P_{cav}$ .

---

### La alta resistencia a la sequía de las especies de árboles mediterráneos tiene un coste en forma de alta densidad de la madera y ritmos de crecimiento lentos.

---

El comportamiento de muchas especies mediterráneas resulta, a primera vista, bastante sorprendente. Como regla general, son muy resistentes a la cavitación (Figura 38) y tienden a presentar los valores de  $P_{cav}$  más negativos registrados hasta la fecha. Sin embargo, el comportamiento de sus estomas no es muy diferente del de las especies con valores de  $P_{cav}$  más altos. En otras palabras, cierran sus estomas mucho antes de que la presión del xilema alcance valores críticos de  $P_{cav}$ . Ambas son evitadoras, en términos de pérdida de agua, y tolerantes en términos de función del xilema. Como resultado, el margen de seguridad hidráulica de las especies mediterráneas es más alto que el de algunas especies más templadas. Esta estrategia explica, en gran parte, el motivo por el que las especies mediterráneas son muy resistentes a la sequía. Sin embargo, hay costes asociados a este comportamiento. En primer lugar, los estomas pueden permanecer abiertos sólo durante una parte muy pequeña de la estación de "crecimiento", es decir, cuando hay agua disponible. Esto podría implicar que estas especies deben maximizar su absorción de carbono durante este período, lo que se traduce en una escasa eficiencia en el uso del agua. La segunda dificultad radica en que el coste de la construcción de los conductos del xilema con una  $P_{cav}$  baja es muy alto. Esto se debe a que las paredes de los conductos se deben reforzar mecánicamente para resistir las altas tensiones del xilema, lo que requiere invertir más recursos de carbono.

### Cuadro 9. Un enfoque genético de la Eficiencia del Uso del Agua (EUA)

Pocos estudios han analizado la diversidad en la EUA en los árboles de los bosques mediterráneos. Se puede llevar a cabo con cruces controlados, para cualquier heredabilidad estimada o para analizar la variabilidad observada en una familia de hermanos completos en componentes heredados mendelianos, es decir para la detección de locus de rasgos cuantitativos (QTL). El primer QTL que sugirió un determinismo genético para la EUA en las especies mediterráneas se encontró para *Pinus pinaster*. Otro estudio detectó 17 QTL para la WUE en *Castanea sativa*, lo que explica una proporción de baja a moderada de la varianza fenotípica total. Los QTL estaban distribuidos a lo largo de todo el genoma. Sin embargo, al comparar estos QTL con los QTL para la EUA en *Quercus robur*, para el cual se mostró un control oligogénico con pocos QTL mayores; pero ningún QTL co-localizado entre las dos especies. A pesar de que los mapas genéticos también existen para *Pinus halepensis* y *Juglans regia*, no se han publicado estudios de detección de QTL hasta la fecha. Para *Pinus pinaster* se ha detectado QTL para las propiedades de la madera y el crecimiento. Los estudios de detección de QTL citados están basados bien en condiciones óptimas, bien en plantaciones naturales sin que se hayan publicado resultados sobre detección de QTL en condiciones de sequía hasta la fecha. Estos QTL son el punto de partida para caracterizar los candidatos tanto funcionales como genéticos. Los genes relacionados con el estrés de la sequía se pueden usar para estudios de genética de poblaciones, elucidando los patrones de selección natural y adaptación, lo que representa un recurso de primer orden para una silvicultura adaptativa y sostenible.

---

Los rasgos adaptativos a la sequía aumentan la posibilidad de supervivencia en condiciones de déficit de agua en el suelo. Sus variaciones entre y dentro de las especies (entre poblaciones) permiten la selección de semillas más indicadas para llevar a cabo las plantaciones.

---

Todos los rasgos discutidos hasta ahora se pueden denominar “adaptativos” para la sequía si aumentan la posibilidad de supervivencia en condiciones de déficit de agua en el suelo. Las diferencias entre rasgos adaptativos entre especies son agentes causales en la distribución de especies, por ejemplo a lo largo de gradientes desde entornos másicos hasta los más xéricos. Sin embargo, y también dentro de las especies, se puede dar diversidad de un rasgo en concreto, resultado de las diferencias en el bagaje genético. Esta diversidad genética sienta las bases para la adaptación de poblaciones (plantas en un entorno común) a las condiciones de su entorno. El bagaje genético de cada individuo se conoce como genotipo. La adaptación es un proceso que cambia la composición de diferentes genotipos dentro de una población a través de la selección natural a lo largo de generaciones, creando así diferencias entre las poblaciones. Observar árboles que crecen de semillas de diferentes poblaciones (p.ej. a través de ensayos de procedencia) es un medio de detectar tales diferencias y, por tanto, identificar las poblaciones que están mejor adaptadas que otras a ciertos entornos. Esto puede derivar en recomendaciones directas para la clasificación de los orígenes de semillas y las estrategias de plantación.

---

La diversidad entre diferentes especies de plantas mediterráneas se muestra en su capacidad para acumular biomasa a través de la fotosíntesis para una cantidad de agua determinada, es decir la **eficiencia en el uso del agua (EUA)**, lo que abre caminos para aplicaciones potenciales en silvicultura.

---

La eficiencia del uso del agua, el porcentaje de biomasa acumulada para una cantidad determinada de agua utilizada, se puede estimar en un gran número de muestras midiendo la composición del isótopo de carbono ( $^{13}\text{C}$ ) del material de la planta (hojas, madera, celulosa extraída de la madera). Se han encontrado diferencias en la EUA entre poblaciones para *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Juglans regia*, *Castanea sativa*, *Quercus ilex* y *Cedrus libani*. Estas diferencias de poblaciones de diferentes especies sugieren que la EUA es un rasgo que se ha seleccionado en entornos específicos y, por ello, importante para la eficacia biológica darwiniana y la supervivencia. Sin embargo, la EUA no es necesariamente un rasgo unido directamente a la resistencia al estrés de la sequía, pero necesita ser interpretada en situaciones medioambientales específicas. Se encuentran ejemplos clásicos para *Pinus pinaster*, y *Castanea sativa* en los que los árboles de procedencias, en un principio, más secas, mostraron una menor EUA, lo que indica que es un rasgo complejo cuyo total entendimiento necesita una exploración más profunda, en particular a través de estudios genéticos (ver Cuadro 9).

### Lecturas recomendadas

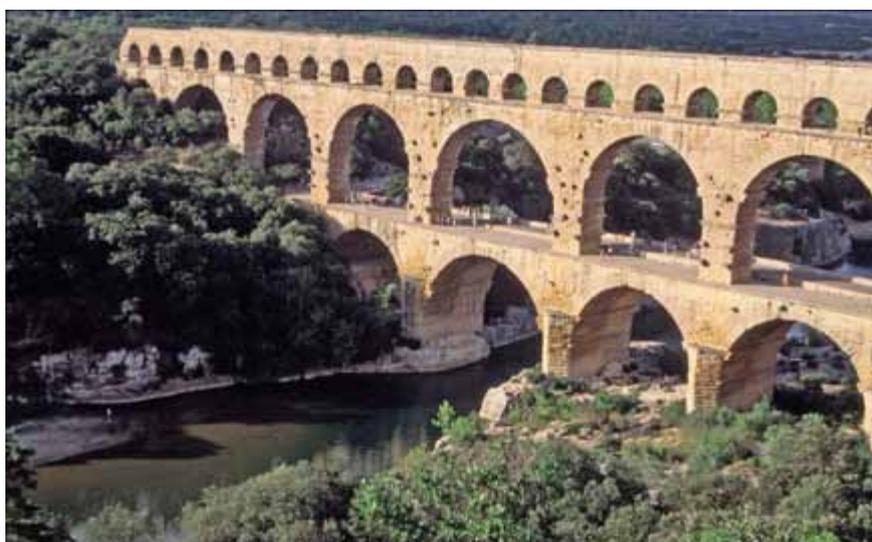
- Baquedano, F. J., Valladares, F. and Castillo, F.J. 2008. Phenotypic plasticity blurs ecotypic divergence in the response of *Quercus coccifera* and *Pinus halepensis* to water stress. *European Journal of Forest Research* 127: 495–506.
- Casasoli, M., Derory, J., Morera-Dutrey, C., Brendel, O., Porth, I., Guehl, J., Villani, F. and Kremer A. 2006. Comparison of quantitative trait loci for adaptive traits between oak and chestnut based on an expressed sequence tag consensus map. *Genetics* 172: 533–546.
- Cochard, H. 2006. Cavitation in trees. *CR Physique* 7:1018–1126.
- Correia, I., Almeida, M., Aguiar, A., Alia, R., David, T. and Pereira, J. 2008. Variations in growth, survival and carbon isotope composition ( $\delta^{13}\text{C}$ ) among *Pinus pinaster* populations of different geographic origins. *Tree Physiology* 28: 1545–1552.
- Eveno, E., Collada, C., Guevara, M.A., Leger, V., Soto, A., Diaz, L., Leger, P., Gonzalez-Martinez, S.C., Cervera, M.T., Plomion, C. and Garnier-Gere, P.H. 2008. Contrasting patterns of selection at *Pinus Pinaster* Ait. drought stress candidate genes as revealed by genetic differentiation analyses. *Molecular Biology and Evolution* 25: 417–437.

# 4.

## Agua azul y/o agua verde: ¿dónde está el compromiso?

La lluvia es la única fuente de agua en una cuenca, en cantidad variable pero finita. La división del flujo de agua entrante entre agua azul y agua verde depende, en gran medida, de procesos naturales en los que los tipos de vegetación y el uso del suelo juegan un papel importante. El desarrollo de la sociedad humanas se ha basado en la domesticación de recursos biológicos (plantas y animales) y físicos (suelo, agua), y en la creciente urbanización e industrialización, tal y como sucedió en el mediterráneo oriental hace ya mucho tiempo. Este desarrollo ha consistido básicamente en el cambio de la cubierta vegetal, y en parte en **redirigir** los flujos de agua de ecosistemas naturales a otros artificiales, de los cursos de agua a las ciudades y, por tanto, de la naturaleza a los seres humanos.

Hoy, al tiempo que los recursos hídricos se vuelven escasos en el Mediterráneo, resulta de vital importancia reconocer la inevitable competencia e incluso los conflictos, que se crean entre objetivos del uso del agua que eventualmente resultan contradictorios. ¿Cómo pueden desarrollarse estrategias basadas en la ciencia, integrando la gestión del agua con las necesidades humanas y medioambientales? Este capítulo presenta algunos aspectos de las posibles maneras de redirigir los flujos de agua entre los componentes de los ecosistemas por medio de la “ingeniería” biológica y física, entre la cabecera y el tramo bajo, así como entre naturaleza y sociedad. Aborda la cuestión del impacto de nuestra vida diaria sobre el agua, y también ilustra algunos proyectos históricos a gran escala de hidrología forestal y de conservación del suelo.



**Figura 39.** El famoso acueducto de Gard (2000 años de antigüedad) en el río Gardon. Construido por los romanos para abastecer de agua azul a la ciudad de Nimes (Francia). Foto: C. Birot.



## 4.1. Garantizar el agua para los árboles y para las personas: posibles escenarios

Carlos Gracia, Jerry Vanclay, Hamed Daly,  
Santiago Sabaté y Javier Gyengé

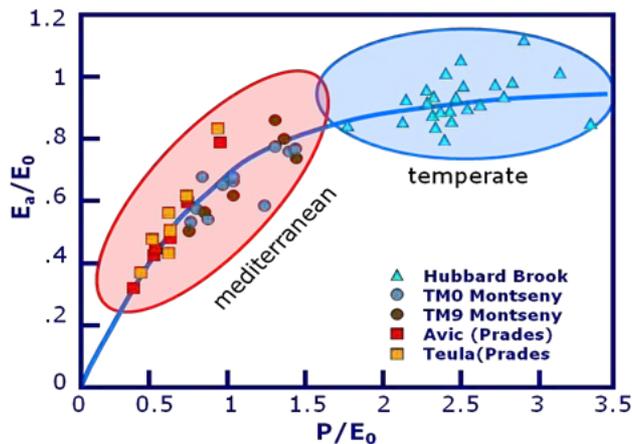
**E**n el contexto de escasez de agua, las amenazas para la supervivencia de los bosques en las áreas más secas, y por lo tanto, del inevitable conflicto entre hombre y naturaleza por el uso del agua, esta sección se orienta a los tres puntos principales de importancia para los ingenieros forestales y los planificadores del uso del suelo:

- a) Las técnicas de gestión de la vegetación (estratos arbóreo y arbustivo) ¿pueden reducir el estrés hídrico de los árboles de los ecosistemas forestales actuales?
- b) La gestión de la vegetación y la planificación del uso del suelo ¿puede aumentar la disponibilidad de agua azul y de agua verde para otros usos además de los bosques?
- c) ¿Hasta qué punto y en qué condiciones se puede destinar el agua verde a las plantaciones de árboles?

Los bosques son necesarios para asegurar la provisión de diversos bienes y servicios para la sociedad, como la protección del suelo y la calidad del agua, relacionados ambos con la estructura del dosel. Fisiológicamente hablando, las hojas de la copa y las raíces finas son las partes más activas de los árboles y, por ende, cualquier régimen de gestión de ecosistemas forestales se debe basar en la comprensión del funcionamiento de ambos componentes y sus respuestas a diferentes tratamientos silvícolas. La albura también resulta esencial, puesto que relaciona las raíces con el dosel, y resulta altamente dependiente de los tratamientos silvícolas.

En la mayoría de los casos, los bosques mediterráneos están formados por densas poblaciones de árboles de escaso diámetro. Durante siglos, los aprovechamientos se han centrado en explotar cepas, en algunos casos con gran capacidad de rebrote. En ciertos ambientes críticos estos tratamientos han dado origen a poblaciones muy densas de árboles pequeños con ritmos de crecimiento muy lentos debido a: I) la falta de disponibilidad de agua combinada con un alto potencial de evapotranspiración típicos del clima mediterráneo, y II) las elevadas tasas de respiración por unidad de biomasa o volumen de madera asociados a la estructura de monte bajo comparados con las tasas de respiración de las poblaciones más “maduras”.

Al mismo tiempo, está aceptado (ver secciones 2.1, 2.1) que los bosques son consumidores netos de agua. La mayor parte de los estudios experimentales han demostrado los altos niveles de transpiración de los ecosistemas forestales y los efectos directos



**Figura 40.** En los bosques mediterráneos, con una precipitación efectiva menor que la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real sólo alcanza a una fracción de aquella, es decir, los bosques crecen en condiciones de limitación hídrica. En los bosques templados o boreales en los que la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real es igual o se acerca mucho a la potencial. Estas características del ambiente están en la base de importantes diferencias de las respuestas ecofisiológicas de los bosques en función de la limitación hídrica a la que se ven sometidos. Fuente: Piñol, J. et al. 1999.

de los bosques sobre la reducción de la disponibilidad hídrica y del caudal de los ríos. En bosques de cubierta continua y limitados por la energía –bosques en los que la disponibilidad de agua es mayor que la evapotranspiración potencial (ETP) –la transpiración anual es muy similar a dicha ETP, mientras que en los bosques con limitaciones de agua, como es el caso de la mayoría de los bosques mediterráneos, la transpiración anual puede dar cuenta de una fracción importante de la lluvia anual. Hasta un 90% en el caso de *Quercus ilex*.

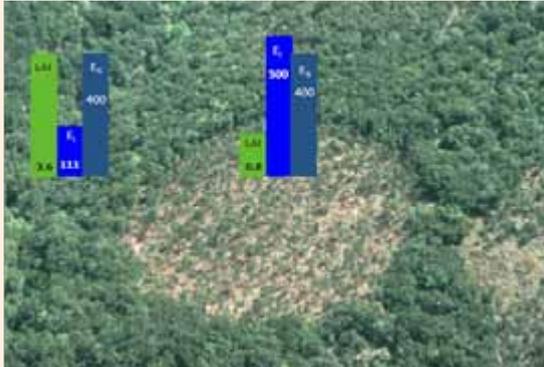
Así, surgen dos preguntas: I) ¿Se puede reducir el estrés hídrico que sufren los árboles y contribuir al mismo tiempo a la supervivencia del bosque mediante una gestión y planificación adecuadas? II) Una gestión y planificación adecuadas ¿pueden resultar útiles para reducir el uso del agua por parte de los bosques y/o aumentar su eficiencia (usar menos agua para producir biomasa)?

Responder a estas preguntas no es fácil. Resulta necesario entender los diferentes requerimientos de agua para las diversas funciones de los árboles y cómo la limitación de agua puede afectar a esas funciones. Se sabe con certeza que la cantidad de agua necesaria para la fotosíntesis es casi despreciable y que la mayor parte del agua se transpira por los estomas a nivel de las hojas. El papel de esta transpiración resulta crucial para el árbol. El agua transpirada es el vehículo que lleva los nutrientes desde el suelo a las hojas y la pérdida de agua por los estomas es el mecanismo que permite la asimilación de carbono por las hojas, entre otros papeles fisiológicos importantes.

En la mayoría de bosques mediterráneos la evapotranspiración potencial es mucho mayor que la precipitación –los árboles no pueden alcanzar las tasas de transpiración potencial debido a la falta de agua (Figura 40). En estas condiciones, la reducción del LAI (por ejemplo, cortando algunos árboles) no se traduce en una reducción proporcional de la transpiración. Los árboles que permanecen en pie utilizan el agua que no consumen los árboles cortados (ver Cuadro 10). Sin embargo, a pesar de esta falta de respuesta aparente en la cantidad de agua transpirada, se dan algunos efectos secundarios positivos, como el hecho de que las claras la supervivencia de los árboles restantes.

**En condiciones mediterráneas, la reducción del LAI (p.ej. por claras) no reduce la transpiración total, pues los árboles que quedan en pie utilizan el agua no transpirada por los árboles cortados. Sin embargo, una consecuencia es que aumenta la supervivencia de los árboles.**

**Cuadro 10. Manipulación experimental en el bosque de *Quercus ilex* de Prades, España. El bosque tiene una estructura de monte bajo con una densidad de rebrotes muy alta que se redujo en diferentes intensidades en parcelas experimentales replicadas. Fuente: Gracia et al. 1999.**



La figura de la izquierda muestra los cambios observados en las tasas de transpiración como resultado de aplicar una de estas intensidades de resalveo (los valores representan el promedio de las tres parcelas replicadas): el índice foliar se redujo de 3,6, en las parcelas de control, a 0,8. La transpiración por unidad de superficie foliar (EL) aumentó de 111 l/m² de hoja/año a un valor de 500 l/m² de hoja/año. Sin embargo, la transpiración por unidad de superficie suelo (EG) permaneció constante en un valor de 400 litros/m² de suelo/año, lo que representa el 84% de la precipitación total del año del en particular.



Dos años más tarde, un período muy seco de más de once meses con menos de 300 mm de lluvia acumulada causó una intensa mortalidad de una parte importante de los árboles en las parcelas control. Las hojas de los árboles de las parcelas resalveadas (izquierda), que transpiraron la misma cantidad de agua pero distribuida entre un número menor de árboles, mantuvieron su potencial hídrico en mejores condiciones que los árboles en las parcelas control; además, no se observó mortalidad a pesar de que se habían recuperado casi totalmente los valores previos de índice foliar (ver también Cuadro 11).

Si una población menos densa transpira la misma cantidad de agua, cada árbol transpira una proporción de agua mayor, lo que puede dar como resultado menos estrés hídrico para los árboles durante condiciones de sequía extrema. Se puede abordar el problema como un análisis coste-beneficio entre la reducción de la densidad de los árboles y el aumento de la capacidad de supervivencia de los árboles restantes en condiciones futuras de sequía severa. Para llevar a cabo un análisis correcto, debemos saber cuánta agua usa para sobrevivir un árbol de una especie determinada, y cómo utiliza dicha cantidad de agua.

La cantidad de agua utilizada en el mantenimiento de la biomasa ya formada y en la fijación del carbono que formará la nueva biomasa, resulta **fácil de entender con un ejemplo** relacionado con el bosque del Cuadro 10. Cuatro años después del aclareo la densidad de los árboles en la parcela experimental era de 2.000 pies/ha con un área basal de 36,4 m²/ha. De la precipitación anual de 580 mm, los árboles transpiraron 490 mm o un 84% de la precipitación total. El árbol promedio de esta población transpiró 2.450 litros de agua. El Cuadro 11 resume la cantidad de carbono necesaria para mantener las

### Cuadro 11. Agua utilizada por los árboles de las parcelas de *Quercus ilex*

La tabla que aparece a continuación resume el uso del agua en las parcelas resalveadas del Cuadro 10. Cuatro años después del resalveo la densidad de los árboles era de 2.000 árboles por hectárea y se había recuperado casi totalmente el índice foliar (3,10) (ver la foto inferior del Cuadro 10). En estas condiciones, los árboles transpiraron el 84% ó 490 mm de la precipitación total anual (580 mm), es decir, en promedio, 2.450 litros de agua por árbol.

Esta tabla compara el coste de mantenimiento y formación de las hojas, raíces finas y madera y la corteza de las ramas, tronco y raíces gruesas en términos del carbono y la transpiración necesaria para fijar este carbono. Anualmente, el bosque transpiró 301 gramos de agua por cada gramo de carbono fijado.

	Biomasa kg/árbol	Producción anual kg/árbol/año	Respiración anual (gC/árbol)		
			Mantenimiento	Formación	Coste Total
			gramos de carbono/árbol/año		
Hojas	2,72	1,13	3.556	833	4.369
Corteza y madera*	91,00	2,10	739	1.544	2.283
Raíces finas	0,40	1,30	514	956	1.469
<b>ÁRBOL</b>			<b>4.789</b>	<b>3.332</b>	<b>8.121</b>
			litros de agua/árbol/año		
Hojas			1.065	251	1.316
Corteza y madera*			223	465	688
Raíces finas			155	288	442
<b>ÁRBOL</b>			<b>1.442</b>	<b>1.004</b>	<b>2.446</b>

\*(incluyendo las raíces gruesas)

Para mantener y formar las hojas, el árbol promedio (ver tabla anterior) requiere transpirar anualmente 1.316 litros de agua con los que fija 4.369 gramos de carbono, haciendo, de la masa foliar, el componente del árbol más caro, por lo que a consumo de agua se refiere. Corteza y madera consumen 688 litros más de agua y las raíces finas, que se renuevan varias veces al año, 442 litros. En total, se transpiran 2.446 litros de agua por árbol cada año. Los costos de mantenimiento requieren 1.442 litros de agua por árbol o 288 mm en total. La transpiración representa 343 mm ó 64% de la precipitación anual.

hojas del dosel, la madera y la corteza de los troncos, raíces gruesas y ramas así como de las raíces finas. Este mantenimiento necesita carbono, que se respira para proporcionar la energía necesaria para reparar o reemplazar las moléculas de los diferentes compuestos necesarios para mantener la funcionalidad de las hojas, raíces finas y células vivas presentes en los tejidos restantes del árbol.

Además, se tienen que formar algunas hojas nuevas y raíces finas para crecer y para reemplazar las pérdidas. En la formación de nuevos tejidos y en el mantenimiento de los que ya están formados, participa el carbono que se fija en la fotosíntesis (el carbono representa el 50% del peso seco de la planta) y este carbono se fija al coste de una ingente cantidad de agua transpirada (ver sección 3.2). Los datos del Cuadro 11 resumen la cantidad de carbono que necesita un árbol medio de la población para mantener y formar los diferentes componentes de su estructura, así como el agua necesaria para fijar este carbono. Es evidente que sólo para mantener los tejidos presentes en el árbol,

### Cuadro 12. Agua utilizada por *Pinus sylvestris*

La siguiente tabla resume el uso de agua del pino medio en un bosque de *Pinus sylvestris* con una densidad de 800 árboles/ha, con un área basal de 36m<sup>2</sup>/ha y un índice foliar de 1.4, más bajo que el índice foliar de *Q. ilex* en el bosque de la Cuadro 11. En estas condiciones, los árboles transpiraron el 68% de la precipitación anual total (430 de los 634 mm); ó 5.378 litros de agua por árbol (en este bosque el árbol medio tiene 24 cm de diámetro a la altura del pecho, mayor que el de las encinas de la Cuadro 11). La tabla compara el coste, en términos de carbono, de mantener y formar hojas, raíces finas y madera y la corteza de las ramas, tronco y raíces gruesas y la transpiración necesaria para fijar este carbono. A lo largo de un año, el bosque transpira 350 gramos de agua por cada gramo de carbono fijado.

	Biomasa kg/árbol	Producción anual kg/árbol/año	Respiración anual (gC/árbol)		
			Mantenimiento	Formación	Coste Total
			gramos de carbono/árbol/año		
Hojas	3,25	1,06	2.600	781	3381
Corteza y madera*	326	2,90	9.403	2.131	11.534
Raíces finas	0,13	0,45	104	328	432
<b>ÁRBOL</b>			<b>12.107</b>	<b>3.240</b>	<b>15.347</b>
			litros de agua/árbol/año		
Hojas			911	274	1185
Corteza y madera*			3.295	747	4.042
Raíces finas			36	115	151
<b>ÁRBOL</b>			<b>4.243</b>	<b>1.136</b>	<b>5.378</b>

\*(incluyendo las raíces gruesas)

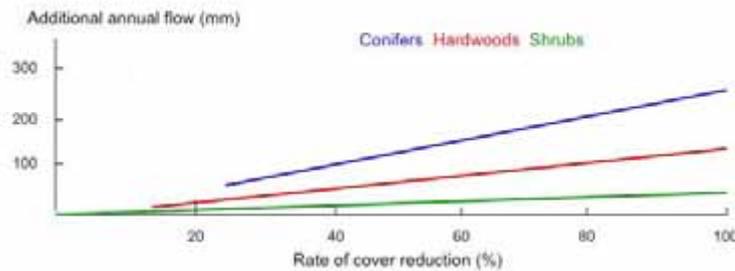
Para mantener y formar las hojas, el árbol medio (ver tabla anterior) requiere transpirar 1.185 litros de agua para fijar 3.381 gramos de carbono. Corteza y madera resultan ser, en este caso, los componentes del árbol más caros debido a la mayor proporción de albura comparada con la de las encinas. Estos tejidos requieren 4.042 litros más de agua que se suman a los anteriores, y las raíces finas, que se renuevan 3,4 veces al año, 151 litros más. En total, cada año se transpiran 5.378 litros de agua por árbol. El mantenimiento supone un consumo de 4.243 litros de agua por árbol ó 339 mm en total. Dado que la transpiración representa el 68% de la precipitación anual, los 339 mm de transpiración representan, a su vez, 498 mm o el 78 % del total anual de precipitación.

se necesitan 1.442 litros de agua (el equivalente al 68% de la precipitación anual); este mantenimiento no compensa la pérdida de hojas y raíces finas que se deben reemplazar con la formación de otras nuevas.

**Mantener los árboles vivos, incluso sin aumento de la biomasa, se traduce en un ingente coste de agua, en particular en las especies perennes tan comunes en el Mediterráneo.**

Sin embargo, no se pueden generalizar estos resultados. La eficiencia en el uso del agua puede variar entre especies (ver sección 3.3): las diferentes estructuras arbóreas o densidades de población que se pueden modificar mediante la poda, el aclareo u otras prácticas silvícolas pueden modificar los valores resultantes; sin embargo, este ejemplo ilustra la enorme cantidad de agua que requiere el funcionamiento de un bosque.

También evidencia un grave riesgo: la reducción de la precipitación proyectada por la mayor parte de modelos de circulación global para el sur de Europa, norte de África



**Figura 41.** Impacto de la reducción de la cubierta forestal (%) sobre flujo anual adicional (mm) en los cinco años posteriores a la tala. Fuente: Bosch y Hewlett, 1982.

ca y otras áreas del mundo, representa una amenaza para la supervivencia de algunos bosques, por lo menos con la estructura que tienen actualmente. Esta amenaza es particularmente grave en aquellos bosques que viven en condiciones medioambientales en las que la precipitación anual es más baja que la ETP, como es el caso de los bosques mediterráneos anteriormente mencionados. En estas condiciones de limitación hídrica, especialmente en aquellas áreas en las que los modelos climáticos proyectan graves reducciones de la precipitación, resulta crucial analizar el coste del bosque, en términos de agua, y evaluar los beneficios fisiológicos de reducir la densidad de la población arbórea. Esta tarea resulta especialmente urgente en las especies mediterráneas con alta densidad de rebrotes. Algunas observaciones recientes evidencian episodios de mortalidad severa en poblaciones de diversas especies de árboles en algunos bosques mediterráneos justo tras tres años secos consecutivos con precipitaciones muy por debajo de la media.

Sin embargo, todavía queda espacio para mitigar la pérdida de agua de los bosques mediante prácticas silvícolas, aunque aún existe una enorme necesidad de investigación en esta área. Algunos ejemplos de las aplicaciones potenciales de los descubrimientos de las nuevas investigaciones se discuten a continuación.

Los patrones de uso del agua en los bosques naturales de eucalipto, en los que la estructura del dosel varía mucho entre la irregular del bosque primario (con árboles que “cortan el viento”) y las más regulares del secundario (coetáneo, sin árboles “cortavientos”), nos ofrecen pistas en el sentido de que el uso del agua se podría reducir al modificar la estructura del dosel. Así, parece posible que los **árboles “cortavientos” en las plantaciones** podrían dar origen a un bosque cuyo comportamiento hidrológico se parezca más al del bosque primario. El número y disposición de árboles, que hacen de barrera contra el viento, necesarios para limitar el consumo de agua, continúa siendo un interesante punto a investigar. Hará falta una cuidadosa selección de las especies para asegurar que se consigue un ahorro hidrológico con cortavientos internos y asegurar que no se limitan a cambiar un problema por otro. Las especies difieren mucho en su capacidad para controlar los estomas – pues algunas especies mantienen un balance hídrico muy ajustado mientras que otras están a merced de los elementos.

Una manera de modificar el uso del agua a través de la estructura del dosel tiene que ver con la capa límite que influencia la manera en que el aire cercano a los árboles se mezcla con la atmósfera superior. Las plantaciones de árboles de edad homogénea tienen una capa límite muy diferente de la de plantaciones mixtas y de bosques maduros, lo que se refleja en el modo en que usan el agua. La rugosidad del dosel es importante porque afecta a su aerodinámica, especialmente a la turbulencia y a la capa límite. Afortunadamente, resulta relativamente fácil, para los gestores forestales, manipular la rugosidad

del dosel por medio de la selección de especies y el régimen de aclareo. Sin embargo, muchas plantaciones son relativamente pequeñas, y los efectos de los bordes resultan importantes. Está claro que la transpiración improductiva se puede reducir suavizando los bordes de las plantaciones mediante la poda y el aclareo, evitando discontinuidades del dosel y, posiblemente, con márgenes de bosque para crear bordes más aerodinámicos.

Existe la evidencia de que la mezcla de especies ofrece otros beneficios además de los hidrológicos. Algunos estudios muestran una gran eficiencia en la producción (relación transpiración: asimilación) en plantaciones mixtas comparadas con las masas puras. *Acacia mearnsii* pura alcanzó un consumo de 1.406 ( $\pm 302$ ) m<sup>3</sup> de agua/m<sup>3</sup> de madera, pero se redujo hasta 882 ( $\pm 98$ ) m<sup>3</sup> de agua/m<sup>3</sup> de madera al mezclarse con *Eucalyptus globulus*. Parece probable que los distintos portes de estas dos especies ayudaran a crear este efecto, puesto que el eucalipto tiende a ser alto y estrecho, mientras que la acacia tiende a ser más baja y ancha, ofreciendo un beneficio mutuo: el alto eucalipto proporciona refugio para la acacia a la vez que la leguminosa proporciona nitrógeno para el eucalipto.

---

En el entorno mediterráneo, restringido por limitaciones hidrológicas, sólo los cambios drásticos en la cubierta forestal, más allá de los límites del aclareo clásico, pueden dar, como resultado, un aumento del agua azul.

---

Como ya se ha mencionado antes, los bosques son, en general, consumidores netos de agua y, por ello, influyen negativamente la provisión de agua, incluso si su cubierta pudiera tener un impacto beneficioso sobre el flujo estacional. Algunos estudios hidrológicos han demostrado que ni las grandes cuencas ni las cuencas experimentales pareadas no resultan adecuadas para investigar la relación entre el uso del suelo y el agua, puesto que la interpretación de los resultados plantea muchos problemas. El conocimiento de que disponemos se basa en experimentos, planificados o llevados a cabo en pequeñas cuencas. Las manipulaciones de la cubierta forestal en la cuenca están relacionadas con talas, aforestación de suelo desnudo o incendios. Una revisión de la literatura sobre 94 cuencas muestra que el flujo adicional relacionado con el ritmo de la reducción de la cubierta puede ser significativo, pero sólo por encima de un umbral del 20% al 30%. Este flujo adicional varía desde un pequeño porcentaje hasta el 20% de la precipitación anual. La magnitud de este flujo adicional resulta también proporcional a la precipitación. El aumento relativo del flujo, en relación a la precipitación anual, para diferentes tipos de cubiertas forestales: coníferas, frondosas y chaparral estaba en un rango, respectivamente, del 10% al 20%, del 0% al 20%, y 5% (tras la corta del chaparral). Para el chaparral, que se localiza en áreas secas (normalmente por debajo de 600 mm), el aumento del flujo alcanzaría sólo 30 mm incluso tras drásticas modificaciones.

Estos datos sugieren que el impacto de los tratamientos de la silvicultura clásica como llas claras intermedias o moderadas sobre un aumento de la provisión de agua, es escaso o inexistente. Esta afirmación se cumple especialmente en los entornos limitados por el agua como en el Mediterráneo. Estos resultados también son consistentes con los anteriormente discutidos, mostrando que el exceso de agua generado por el resalveo, en un encinar con estructura de monte bajo, es consumido enteramente por los árboles que quedan en pie tras el resalveo. Se puede concluir de que sólo las modificaciones drásticas de la cubierta forestal, como su eliminación, parcial o total, pueden dar como resultado un aumento significativo de la provisión de agua.

La cuestión de un cambio drástico en la cubierta forestal, y por ende del uso del suelo, para aumentar la producción de agua azul en el tramo bajo merece gran atención y debería relacionarse con todos los bienes y servicios relacionados con la cubierta inicial e integrarlos. La erosión del suelo, entre otros, representa una grave amenaza en el Mediterráneo (ver sección 1.5) y no debería desestimarse. También se puede considerar el cambio parcial o total de la cubierta forestal de una cuenca. Se trata de redirigir el flujo de agua verde desde los árboles hacia otras cubiertas vegetales: pastos en tierras marginales, cultivos en los campos, sistemas agroforestales, etc. Estos posibles cambios precisan de una profunda valoración de los pros y los contras.

---

**El cambio drástico de la cubierta forestal para incrementar la producción de agua azul en el tramo bajo merece especial atención y debería integrar todos los bienes y servicios relacionados con la cubierta inicial.**

---

Plantar árboles en un contexto de escasez general de agua debería tener en cuenta no sólo la enorme cantidad de bienes y servicios, de mercado o no, que se pueden proporcionar, sino también el gran número de partes implicadas a nivel local y nacional que pueden resultar afectadas y que tienen percepciones diferentes y hasta divergentes sobre la plantación forestal y el uso de los recursos naturales (Cuadro 13).

---

**Los usuarios de la cabecera fluvial se pueden beneficiar de las plantaciones forestales, mientras que los del tramo bajo de la cuenca se verían afectados por los efectos del cambio en la gestión del suelo en la cantidad y la calidad del agua que llega a las reservas.**

---

Mientras la administración pública está más preocupada en la protección del suelo y de los recursos hidrológicos y el desarrollo económico, la propiedad privada está más interesada en los beneficios privados a corto plazo que puede aportar la plantación. A la población local, que vive en las áreas forestales, especialmente en los países del sur y del este del Mediterráneo, también les gustaría incrementar a corto plazo sus ingresos privados gracias a la utilización de los recursos naturales. También podría hacerse otra distinción entre los usuarios de la cabecera y los del tramo bajo. Los primeros se beneficiarían del uso directo de la plantación forestal, mientras que los usuarios de los recursos hídricos del tramo bajo se verían afectados por los efectos del cambio en la gestión del suelo de la cabecera sobre la cantidad y calidad del agua que llega al embalse. Esta característica mixta entre los distintos servicios forestales y su dimensión escalar pone de relieve el compromiso entre la protección de la cuenca y los beneficios locales para los propietarios de los bosques o usuarios locales. La situación se torna más compleja puesto que algunos de los cambios en el uso del suelo pueden tener efectos irreversibles, al menos a corto plazo, en el desarrollo de los bosques.

En este escenario de conflictos y controversias, los efectos del cambio de uso del suelo sobre los recursos hidrológicos y su distribución entre las partes implicadas se deberían analizar antes de establecer una estrategia de plantación en un entorno de limitación hídrica. Por ejemplo, antes de la conversión de los matorrales en plantaciones forestales se deberían comparar las situaciones con y sin intervención: ¿cuáles serían los efectos

### Cuadro 13. Negociación de un proyecto de reforestación en Túnez

Durante un ejercicio de evaluación participativa en las paupérrimas áreas montañosas de Zaghouan, en Túnez, los participantes de los *douars* (pueblos) de los alrededores expresaron serias preocupaciones sobre las restricciones impuestas por un nuevo proyecto de reforestación mecanizado que cubría las cumbres de las colinas del bosque de Sidi Salem (410 ha). Antes del proyecto, las comunidades locales veían los bosques públicos como un área en la que podían pastorear sus rebaños libremente, y en la que también recogían leña y hierbas medicinales. La reforestación implicaba trabajos con maquinaria pesada y replantar toda el área con pinos carrascos en parcelas valladas. Se prohibió el uso tradicional de los productos de los bosques hasta que la madera comercial se hubo vendido a comerciantes forasteros tras un período de rotación de nueve años. Las comunidades locales, por lo tanto, percibían el programa como una amenaza a sus derechos tradicionales.

Para tratar el tema, los responsables del proyecto se reunió con representantes locales y con los Servicios Forestales y de Conservación del Suelo. El objetivo era identificar posibles medidas, técnica y económicamente aceptables, para las instituciones implicadas en el proyecto, al tiempo que respondían a las necesidades locales. La propuesta común final incluyó las siguientes medidas: I) reemplazar el pino carrasco en las pendientes suaves por especies de árboles de crecimiento rápido aprovechables por el ganado y productoras de miel, para reducir el período de limitación del pastoreo II) modificar la red de cortafuegos para permitir al ganado el acceso a la zona superior del bosque y III) dejar las secciones de mayor pendiente para el pino carrasco y ocupar el resto con parcelas de especies aprovechables por el ganado.

El acuerdo también promovió la participación de la comunidad en la implementación del proyecto por medio de iniciativas como: I) la contratación de grupos de interés local para preparar y mantener las plantaciones, II) establecer parcelas piloto para probar la introducción de especies forrajeras locales, III) crear una asociación forestal local que se responsabilizara de la gestión de acuerdo con la legislación tunecina, y IV) proporcionar microcréditos para la adquisición de estufas más eficientes, que requirieran menos leña.

Se integraron actividades como discusiones y negociaciones sobre el reparto de costes y obligaciones recíprocas en los planes de acción de los *douars* afectados y las instituciones implicadas, sin coste adicional para el proyecto.

Fuente: FAO, 1997.

*in situ* sobre los usuarios directos a largo plazo (madera, forraje, frutos, etc.) y cuáles los efectos a mayor distancia sobre los flujos de agua, la recarga subterránea y calidad de los sedimentos y del agua? ¿Qué ganancias netas puede proporcionar a los propietarios del bosque, los usuarios locales y qué beneficios netos desde una perspectiva social? ¿Quién gana y quién pierde con este cambio del uso del suelo? La plantación sólo se podrá llevar a cabo si es económicamente deseable desde una perspectiva social, es decir, si los beneficios netos descontados de la plantación resultan superiores a los que se obtienen sin la intervención y ésta resulta financieramente viable. El análisis también debería considerar los efectos proyectados del cambio climático que, en algunos casos, reducirá gravemente la disponibilidad de agua. Por lo tanto, es necesario compensar la pérdida potencial de ingresos si se llevan a cabo las mejoras en la fertilidad del suelo y la capacidad de uso del agua. Los beneficios sin mercado y los efectos a distancia no se suelen tener en cuenta porque sigue siendo muy difícil evaluar los efectos del uso del suelo sobre la erosión y los recursos hídricos, especialmente en cuencas grandes. Normalmente, se hace necesaria la intervención pública a través de subsidios, subvenciones y compensaciones por la pérdida de ingresos para cubrir el vacío entre la rentabilidad privada y la utilidad pública. Aparte de estos instrumentos tradicionales, se introdujeron otros instrumentos basados en el mercado y en el pago por parte de los beneficiarios externos que reciben los servicios. Los servicios más solicitados fueron los de provisión de agua,

#### Cuadro 14. Ejemplo de un pago por servicios ambientales (PSA) en una cuenca tunecina.

Proponemos un ejemplo ilustrativo de un plan potencial de PSA extraído de la gestión de la cuenca de Barbara en el noreste de Túnez. La mayor parte del suelo es propiedad privada y en él se cultivan cereales. Para proteger la infraestructura hídrica del tramo bajo el gobierno concede importantes subsidios (el 80% del coste de la inversión) para proteger los barrancos con plantaciones o con barreras protectoras de acacia. Sin embargo, la concesión de estos subsidios no está sujeta a condición ninguna y los propietarios del suelo no reciben compensaciones por los gastos ni por la reducción de ingresos derivada de la pérdida de pastos. Como consecuencia, la supervivencia de la acacia es bastante baja. El análisis económico de diferentes alternativas de uso del suelo demuestra que cualquier medida de protección resulta menos provechosa para los agricultores que la producción de cereales; sólo un cereal en combinación con la plantación de acacia en los barrancos parece ser aprovechable, desde una perspectiva nacional. Para fomentar la plantación de acacias, pues, los campesinos deberían ser compensados por la disminución de sus ingresos (100 TND/ha). Esta compensación se podría cubrir con el ahorro derivado del control de la sedimentación (200 TND/ha). El pago de los usuarios del agua podría incrementar el presupuesto disponible para la conservación, contribuir a un uso más eficiente del agua y podría aumentar la tasa de supervivencia de la acacia puesto que el pago de los subsidios podría condicionarse a indicadores del éxito de la plantación.

que se implementaron a través del plan de Pago por Servicios Ambientales (PSA) es decir, negociaciones directas entre los usuarios de agua y los propietarios del suelo (Cuadro 14); el comercio de “créditos” entre compañías y propietarios del suelo por aumentar la demanda de agua; o pagos públicos a los campesinos/ propietarios de los bosques por prácticas de gestión que protejan la calidad del agua.

Las inversiones en plantaciones forestales producen menos ganancias directas comparadas con el escenario habitual (*business as usual*) pero podrían generar beneficios mayores para la sociedad si se incluyeran externalidades a escala local—y nacional— como el aumento de la fertilidad del suelo y de la capacidad de agua, y externalidades a escala global como la protección de la biodiversidad y el secuestro de carbono.

#### Lecturas recomendadas

- Achouri, M. 2002. Forests and Water: Towards Effective Watershed Management. International Expert Meeting on forests and water. 20–22 November 2002, Shiga, Japan.
- Cossalter, C. and Pye-Smith, C. 2005. Fast-wood forestry: myths and realities. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Croitoru, L. and Daly-Hassen, H. 2010. Using Payments for Environmental Services to Improve Conservation in a Tunisian Watershed. Mountain Forum Bulletin, January 2010.
- Daly-Hassen, H., Pettenella, D. and Jemal, Ahmed T. 2010. Economic instruments for the sustainable management of Mediterranean watersheds. *Forest systems* 19(2).
- Lavabre, J. and V. Andréassian, 2000. Eaux et forêts. La forêt: un outil de gestion des eaux? [Waters and Forests. Can forest be a water management tool?] Cemagref, Antony. 147 p.
- Perrot-Maitre, D. and Davis, P. 2001. Case studies: Developing markets for water services from forests. *Forest Trends*, Washington D.C. ([www.forest-trends.org](http://www.forest-trends.org)).
- Roda, F., Retana, J., Gracia, C. and Bellot, J. (Eds.) 1999. Ecology of Mediterranean evergreen oak forests. *Ecological Studies* 137: 368.

# 4.2.

## Agua para los ecosistemas, los bienes y servicios y para las personas

**Robert Mavsar**

Tanto el agua como los bienes y servicios de los ecosistemas resultan fundamentales para nuestra existencia.

**E**l agua dulce resulta, sin lugar a dudas, esencial, y en muchos casos insustituible, para la supervivencia de la vida no marina. El agua, por tanto, no constituye un lujo sino un elemento fundamental para el sostén de la vida.

En relación con las actividades humanas, el agua dulce también resulta única al no tener sustituto para la mayoría de usos. En general, la importancia del agua se relaciona principalmente con el uso directo de agua azul para el riego agrícola, la producción industrial y el uso doméstico, por ejemplo. Sin embargo, este uso directo del agua no resulta suficiente para asegurar nuestra existencia. El agua también resulta necesaria para sostener los bienes y servicios de los múltiples ecosistemas de los que dependemos en gran medida. Estos bienes y servicios representan los beneficios que los humanos obtenemos directa o indirectamente de los ecosistemas (terrestres y acuáticos). Como se ha explicado brevemente en la sección 3.1, incluyen una amplia variedad de bienes y servicios que se pueden dividir en cuatro categorías principales (ver Tabla 5).

**Servicios de suministro** son los productos que las personas obtienen de los ecosistemas tales como cómo alimento, combustibles, agua dulce. **Servicios de regulación** son

**Tabla 5.** Bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas

suministro	regulación	culturales
Alimento	Regulación de la calidad del aire	Diversidad cultural
Fibras	Regulación climática	Valores espirituales y religiosos
Recursos genéticos	Regulación del agua	Sistemas de conocimiento
Bioquímicos, medicinas naturales, farmacéuticos	Regulación de la erosión	Valores educativos
Agua dulce	Purificación del agua y tratamiento de los residuos	Inspiración
	Regulación de enfermedades	Valores estéticos
	Regulación de plagas	Relaciones sociales
	Polinización	Sentimiento de arraigo
	Regulación natural de los riesgos	Valores de patrimonio cultural
Soporte		Ocio y ecoturismo

Formación del suelo, Fotosíntesis, Producción primaria, Ciclo de nutrientes y Ciclo hídrico

Fuente: Informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005.

los beneficios que se obtienen de la regulación de los procesos que tienen lugar en los ecosistemas, incluyendo el mantenimiento de la calidad del aire, la regulación del clima, y el control y la purificación del agua. **Servicios culturales** beneficios inmateriales que obtienen las personas a través del enriquecimiento espiritual, el esparcimiento y las experiencias estéticas. **Servicios de soporte** aquellos que son necesarios para la producción de todos los otros servicios de los ecosistemas como la producción primaria, la polinización, la producción de oxígeno, y la formación del suelo. Los servicios de soporte se diferencian de los de suministro, regulación y culturales por tener un impacto indirecto sobre las personas.

El agua (azul y verde) resulta necesaria para el funcionamiento de los ecosistemas y para mantener su producción de bienes y servicios.

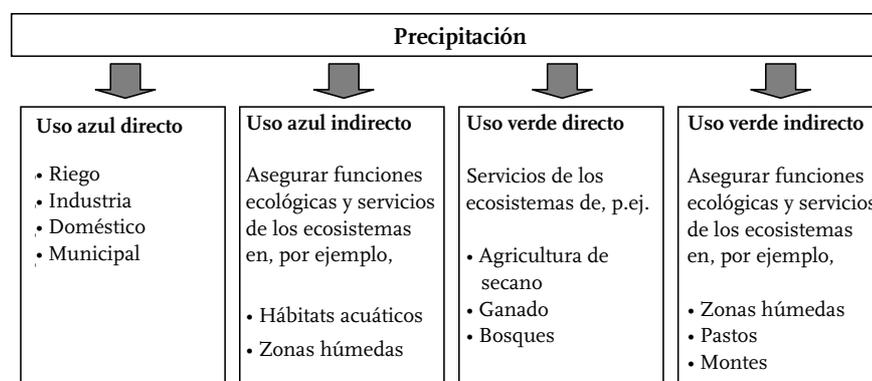
---

**Agua azul y agua verde son necesarias para posibilitar el funcionamiento de los ecosistemas y para mantener la producción de bienes y servicios que todos necesitamos.**

---

Al estimar la importancia del agua debemos considerar tanto el uso directo como el indirecto del agua azul y verde. El “uso directo” se refiere a la utilización que beneficia directamente a la sociedad. En contraste, el “uso indirecto” se refiere a aquellas funciones del agua que benefician a la sociedad de un modo indirecto como los flujos de agua verde que contribuyen al desarrollo de los hábitats.

Si consideramos el agua de lluvia como la principal fuente de agua dulce, la podemos dividir en cuatro flujos principales (ver Figura 42). **El uso directo de agua azul**, se refiere al agua azul utilizada para producción de alimentos en la agricultura de regadío, producción industrial, uso doméstico (comer, beber, lavar) y para proporcionar los servicios municipales. **El uso indirecto del agua azul**, se refiere al agua invertida para garantizar los bienes y servicios de ecosistemas de agua dulce (zonas húmedas, cuencas de ríos y lagos). **El uso directo del agua verde**, garantiza los bienes y servicios que se consumen directamente (alimento, fibras, madera y combustible) y que son suministrados por la agricultura de secano y la producción ganadera, los bosques y los ecosistemas. Finalmente, al hablar del **uso indirecto del agua verde** nos estamos refiriendo a



**Figura 42.** División de la precipitación en aguas verdes y azules para uso directo e indirecto.

**Tabla 6.** Porcentaje de precipitación necesario para mantener actividades humanas que dependen del agua a nivel global.

Agua	% de precipitación	Dominio de flujo		Uso	% de precipitación	
Azul	38%	Disponible	Usada	Alimentación (riego)	2%	
				Uso doméstico e industrial	1%	
			Sin usar	Escorrentía permanente (ríos)	8%	
		No disponible	Escorrentía de inundación (no utilizable)	27%		
Verde	62%	Directa		Alimentación (secano)	4%	
				Pastoreo permanente	18%	
		Indirecta			Pastos	11%
					Bosques y montes	17%
					Suelos áridos	5%
					Tierras húmedas	1%
					Evaporación de lagos	1%
		Flujo verde no contabilizado	5%			

Fuente: Rockström et al. 1999.

los bienes y servicios ecosistémicos que nos proporcionan los humedales, las praderas y los bosques, etc., y que, indirectamente, benefician a la sociedad (secuestro de carbono, biodiversidad y polinización).

---

**La mayor parte del agua de lluvia se distribuye naturalmente y se invierte en la producción de los bienes y servicios que nos proporcionan los ecosistemas.**

---

A escala global, el uso tradicional de agua dulce (extracción directa de agua azul) representa sólo el 3% de la precipitación anual (ver Tabla 6), que es aproximadamente un tercio del agua azul disponible.

En el pasado se consideraba que la producción de alimentos (agricultura) era la principal fuente de consumo de agua. Según los cálculos actuales sólo el 2% del agua de lluvia se usa para producción de alimento en áreas de regadío. Sin embargo, se trata de cifras parciales puesto que, en promedio, casi el 70% de la producción actual de alimentos se origina en agricultura de regadío.

Por otro lado, la mayor parte del agua disponible se usa para el mantenimiento de los principales ecosistemas, y para la provisión de bienes y servicios (uso indirecto de agua verde y azul). En otras palabras, casi el 90% del agua verde global sirve para sostener los bienes y servicios de los ecosistemas de la mayor parte de biomas.

---

**Una reducción drástica del área forestal podría aumentar la disponibilidad de agua, pero influenciaría negativamente la provisión de bienes y servicios de los ecosistemas.**

---

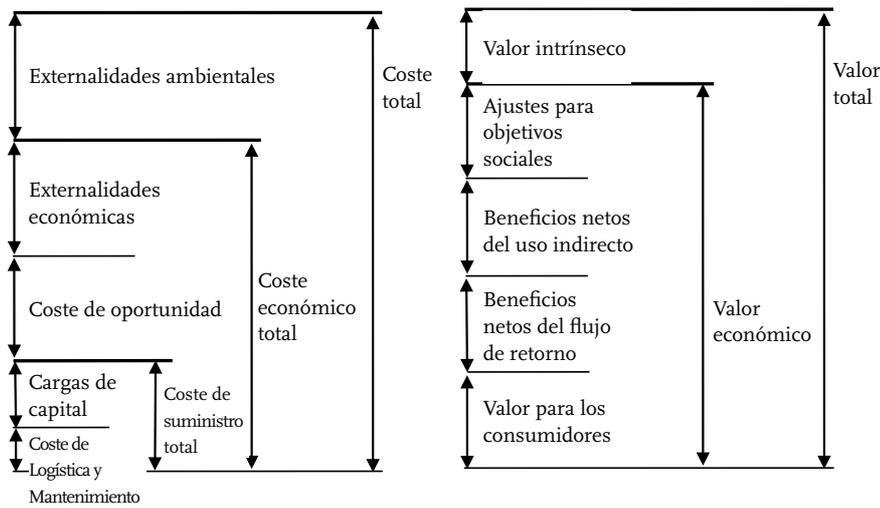


Figura 43. Componentes generales del coste y valor del agua. Fuente: Rogers et al., 2002.

Tal y como se ha explicado en la sección 4.1., los bosques necesitan agua para su existencia y, por lo tanto, tienen un impacto negativo en la cantidad de agua que queda a nuestra disposición. Sin embargo, el agua que consumen los bosques también es necesaria para mantener su capacidad de proporcionarnos bienes y servicios. Esto sugiere que una disminución de la cubierta forestal, por un lado, aumentaría la cantidad de agua disponible para otros usos; pero, por otro lado, reduciría la capacidad de los bosques de producir bienes y servicios ecosistémicos.

Para explorar la dimensión económica de una política dirigida a reducir la cubierta forestal, se deberían comparar los incrementos de agua (así como su valor) con las pérdidas de bienes y servicios medioambientales y su valor. El tema del consumo de agua por parte de los bosques ya ha sido tratado en la sección 4.1. En este capítulo sólo considera los aspectos económicos y el valor de los bienes y servicios que nos proporcionan los ecosistemas.

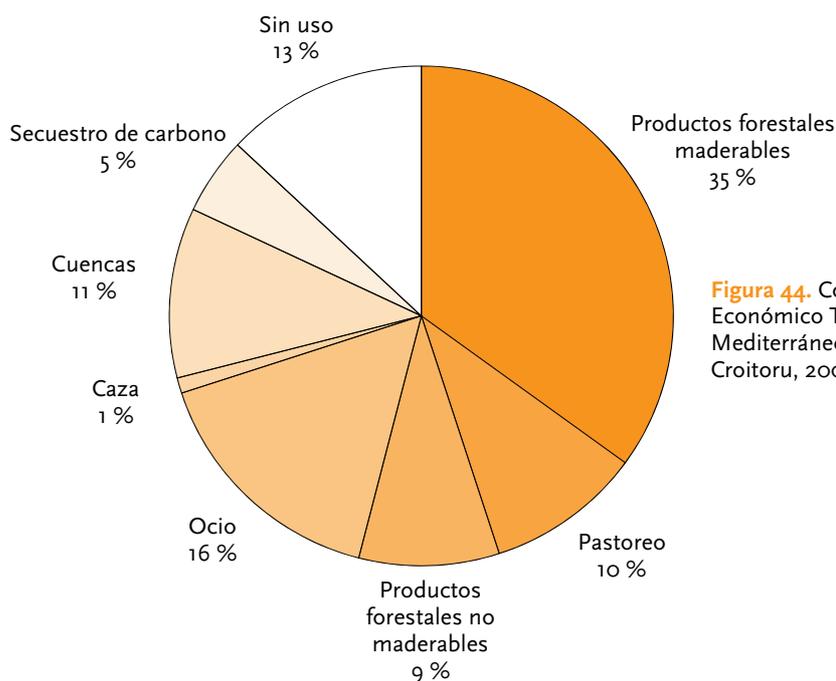
Al tener en cuenta el valor del agua, se deberían distinguir al menos dos conceptos: su valor y su precio (ver Figura 43). De acuerdo con una de las clasificaciones, el valor del agua se compone del valor económico y el valor intrínseco. El **valor económico** incluye el valor que tiene el agua para sus usuarios (por ejemplo su valor en usos industriales y agrícolas y la voluntad de pagar por el uso doméstico); los beneficios netos (beneficios asociados a las mejoras en los ingresos y en la salud que pueden derivarse de proyectos que proporcionen agua para irrigación, uso doméstico y del ganado); y ajustes sociales (alivio de la pobreza, generación de empleo y seguridad alimenticia). El **valor intrínseco** del agua incluye la custodia, el legado y el simple valor de su existencia.

Sin embargo, el precio real del agua viene definido principalmente en base al coste del suministro. El enfoque recomendado sería definir el precio del agua en base al coste total. Este coste incluye los gastos del suministro (de operaciones y mantenimiento, costes del capital), externalidades económicas y medioambientales (Figura 43). Sin embargo, en la mayoría de los países del área mediterránea, el precio del agua está por debajo de su coste total. La Tabla 7 da ejemplos de los precios del agua para la agricultura. Tal sistema de poner precios no sólo infravalora el precio del agua, tampoco proporciona incentivos para un uso más eficiente del agua (ver sección 5.5).

**Tabla 7.** Estructura de los métodos para fijar el precio en agricultura y niveles de precios. Fuente: Chohin-Kuper et al., 2003.

Estructura del precio	País	Precio		Incentivos para ahorrar agua
		Euros/ha	Euros/m <sup>3</sup>	
Gratis	Egipto Albania			Ninguno
Por área (por hectárea)	Francia Grecia España Líbano	108 75-175 32-200 227		Bajos
Por área dependiendo del cultivo	Turquía (y por región) Italia (y por el tipo de suelo)	16-80 24-200		Bajos
Volumétrico uniforme	España (raro) Marruecos (parte) Túnez (parte) Chipre Francia (ASA) Francia (SAR)		0,02-0,06* 0,01-0,04 0,07 0,095 0,05-0,06 0,05-0,23*	Bajos Bajos Bajos Moderados Moderados Moderados a altos
Opcional	Francia (SAR)	40 ó 25	0,05 ó 0,14	Moderados
Con incrementos por bloques	Jordania Israel		0,02 0,10	Moderados Moderados, Altos en los límites de la cuota

\*Sólo el componente volumétrico de una tarifa en dos partes



**Figura 44.** Composición del Valor Económico Total de los Bosques Mediterráneos. Fuente: Merlo & Croitoru, 2005.

Con respecto al valor económico de los bienes y servicios, se debería tener en cuenta que muy pocos de ellos tienen precios de mercado establecidos o se comercian en mercados tradicionales. No obstante, se reconoce que estos servicios son de vital importancia y valor para la sociedad. Durante las últimas décadas, se han llevado a cabo una serie

de estudios para estimar el valor económico de los bienes y servicios de diferentes ecosistemas. Por ejemplo, Merlo y Croitoru (2005) estimaron que el valor económico medio total de los bosques mediterráneos estaba en el rango de los 133 € por hectárea de bosque, en otras palabras: casi 50 € per cápita y año. Sólo un 35% de este valor se puede atribuir a los productos madereros (ver Figura 44). Sin embargo, se debería tener en cuenta que esos valores se obtuvieron como promedio de muchos casos diferentes. En la práctica, significa que, dependiendo del caso, el valor económico de los bienes y servicios puede variar significativamente en magnitud y composición.

Resulta difícil realizar afirmaciones generales sobre la magnitud de los efectos sociales y económicos de la reducción potencial del área forestal para aumentar la disponibilidad de agua para otros usos como la agricultura, la industria y el uso personal. Es más, lo más probable es que estos cambios influyeran no sólo en el bienestar social, sino que también podrían tener un impacto significativo sobre la distribución, especialmente en aquellos sectores de la población mundial que dependen directamente de los bienes y servicios suministrados por los bosques y otros ecosistemas. En conclusión, no se debería considerar a los bosques como simples consumidores netos de agua, sino además como proveedores de los bienes y servicios ecosistémicos que resultan esenciales para el bienestar de todos los humanos.

### Lecturas recomendadas

- Chohin-Kuper, A., Rieu, T. and Montginoul, M. 2003. Water policy reforms: pricing water, cost recovery, water demand and impact on agriculture. Lessons from the Mediterranean experience. Water Pricing Seminar (June 30 – July 2, 2003) Agencia Catalana del Agua & World bank Institute; Parallel session C: The impact of cost recovery on Agriculture. [www.semide.net/media\_server/files/i/9/CohinRieuMontginoulWaterpolicyreformspricingwatercostrecoverywaterdemand.pdf]
- Falkenmark, M. and Rockström, J. 2005. Balancing Water for Humans and Nature. Earthscan, Sterling.
- Merlo, M. and Croitoru, L. (2005) Valuing Mediterranean Forests – Towards Total Economic Value. CABI Publishing.
- Millennium Ecosystem Assessment 2005. Ecosystem Services and Human Well-being: Wetlands and Water. 80 p. [www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf]
- Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M. and Engwall, M. 1999. Linkages Among Water Vapor Flows, Food Production, and Terrestrial Ecosystem Services. Conservation Ecology 3(2): 5. [www.consecol.org/vol3/iss2/art5]
- Rogers, P., de Silva, R. and Bhatia, R. 2002. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. Water Policy 4: 1–17.
- Turner, K., Georgiu, S., Clark, R., Brouwer, R. and Burke, J. 2004. Economic valuation of water resources in agriculture: From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Water reports 27. FAO, Rome. 203 p. [www.fao.org/docrep/007/y5582e/y5582e00.htm#Contents]

## 4.3.

## Gestión integrada del agua a escala del paisaje:

### La ciencia como base del desarrollo – Un caso de estudio en Túnez

Jean Albergel, Jean Collinet, Patrick Zante y Hedi Hamrouni

La sección 1.5. ha dejado clara la importancia de tratar agua y suelo, en el Mediterráneo, como cuestiones interrelacionadas. La gestión integrada del agua y del suelo alrededor de la cuenca mediterránea se basa en diferentes enfoques que dependen del país. Entre el “ni una gota de agua más al mar” y la reducción del agua subterránea hasta su agotamiento en los acuíferos fósiles hay un abanico de posibilidades. Basándose en el ejemplo del programa nacional de gestión de cuencas en Túnez como un caso de estudio, esta sección pretende ilustrar cómo los recientes logros científicos pueden suministrar soluciones concretas para respaldar y mejorar la gestión integrada del agua a escala del paisaje.

Las estrategias dirigidas a aumentar la disponibilidad de recursos hídricos, a limitar las inundaciones y a reducir los efectos negativos de la erosión del suelo han evolucionado hacia el diseño y puesta a punto de un vasto programa de gestión de cuencas a pequeña escala (< 50 km<sup>2</sup>) del que se ha utilizado un subconjunto para una investigación paralela orientada a mejorar el conocimiento en vistas a una posterior ampliación del programa.

Parece reforzarse la idea de la construcción de **pequeñas presas** como instalaciones cuyos objetivos no se limitan a la utilización de los recursos hídricos superficiales, también tienen como objetivo el control de las inundaciones, protegiendo las grandes estructuras del tramo bajo y limitando su colmatación. En los últimos años, Túnez y Marruecos han optado por esta solución. En Túnez, en el contexto de un proyecto de 1.000 pequeñas presas, más de 500 ya han sido construidas con los siguientes objetivos: I) gestionar las pendientes para reducir la pérdida de suelo agrícola que suma 5.200 ha/año, II) reducir la colmatación de algunas de las 10 mayores presas en el tramo bajo, proceso que alcanza los 25 millones de m<sup>3</sup>/año; III) aumentar la recarga de agua subterránea; IV) movilizar la mayor parte de los 500 millones de metros cúbicos perdidos en *sebrkrhas* (es decir, depresiones saladas en zonas áridas) o en el mar y V) crear puntos de desarrollo del regadío.

Un embalse de vertiente se forma como resultado de la construcción de una pequeña presa hecha de tierra en el lecho de un río efímero o intermitente. La presa puede llegar a alcanzar los 10 metros de altura (pero siempre por debajo de los 15 metros, que es el umbral definido por la declaración de la comisión internacional para las grandes presas) y está equipada con un aliviadero lateral. Este aliviadero, se usa como seguro en caso de lluvias muy intensas. Los embalses de vertiente presentan una gran diversi-

**Tabla 8.** Colmatación de pequeñas presas en 13 lagos de retención de agua con variadas cubiertas del suelo. Fuente: Directorado –ACTA e IRD Túnez. Las figuras no muestran ni expresan las relaciones entre la cubierta forestal y la protección contra la erosión. Las tierras de cultivo protegen mejor los suelos al usar técnicas de conservación del agua y del suelo. El porcentaje de suelos desnudos en la cuenca tampoco es un indicador fiable del transporte de sólidos. Los suelos desnudos se pueden desarrollar en margas, muy sensibles a la erosión, o en material rocoso que produce muy pocos sedimentos.

Estación	Área de la cuenca	Año de construcción	Volumen de colmatación 96	Esperanza de vida	Vol. Exportado	Erosión total	Erosión esperada	% de Vegetación		
								hectáreas	103m <sup>3</sup>	Años
Sadine 1	384,0	1988	31,2	9	4,7	54,8	17,8	0	68	32
Fidh Ali	412,5	1991	29,6	23	0	47,4	23,0	0	12	88
M'Richet el Anse	158,0	1991	5	42	0	8	10,1	0	92	8
El Gouazine	1.810,0	1990	16,8	83	4,4	28,3	2,6	20	65	15
Hadada	469,0	1992	14	24	1,3	23,8	12,7	0	76	24
Janet	521,0	1992	36	11	3,5	61,1	29,3	0	62	38
Dekikira	307,0	1991	21	51	0	34,1	22,2	33	35	42
Es Senega	363,0	1991	12	36	0,4	19,3	10,6	0	34	66
Arara	708,0	1993	41	7	4,1	70,1	33,0	59	41	0
Saadine	272,0	1992	27	7	6,6	50,3	46,3	30	70	0
Es Seghir	431,0	1992	2	>100	0	3,2	1,9	20	80	0
Kemech	245,5	1993	11,4	38	10	282	38,3	0	75	25
Brahim Zaher	464,4	1992	14,4	24	0,2	23,1	12,5	30	27	43

dad y capacidad, variando desde centenares a varios cientos de miles de metros cúbicos, mientras que las áreas de las cuencas varían de unas pocas hectáreas a varias decenas de kilómetros cuadrados

Desde 1995 se han seleccionado veintiséis de ellas y se han equipado para construir una red de observatorios hidrológicos con el objetivo de evaluar su colmatación y, de ese modo, su período de vida y la erosión total de la cuenca (Tabla 8).

Se han llevado a cabo experimentos de simulación de lluvia y modelización de la escorrentía, almacenamiento hídrico y pérdida de suelo de las laderas que permiten abogar por la implantación de medidas de gestión y conservación a escala de la cuenca sobre una sólida base científica.

El conocimiento basado en los cálculos de la reserva hídrica útil del suelo (RU) permite: I) simular una variedad de resultados según la lluvia anual, II) comparar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de las cuencas con la de las instalaciones que retienen el agua (presas), y III) simular las necesidades de irrigación en relación con diversas cubiertas forestales. Finalmente, proporciona herramientas para lograr el equilibrio entre agua azul y verde.

La capacidad de almacenamiento se estimó inicialmente, a partir de parámetros climáticos, para suelos con características hidro-físicas que se asumió que eran homogéneas a una profundidad constante. Posteriormente, se utilizó una evaluación mejor del

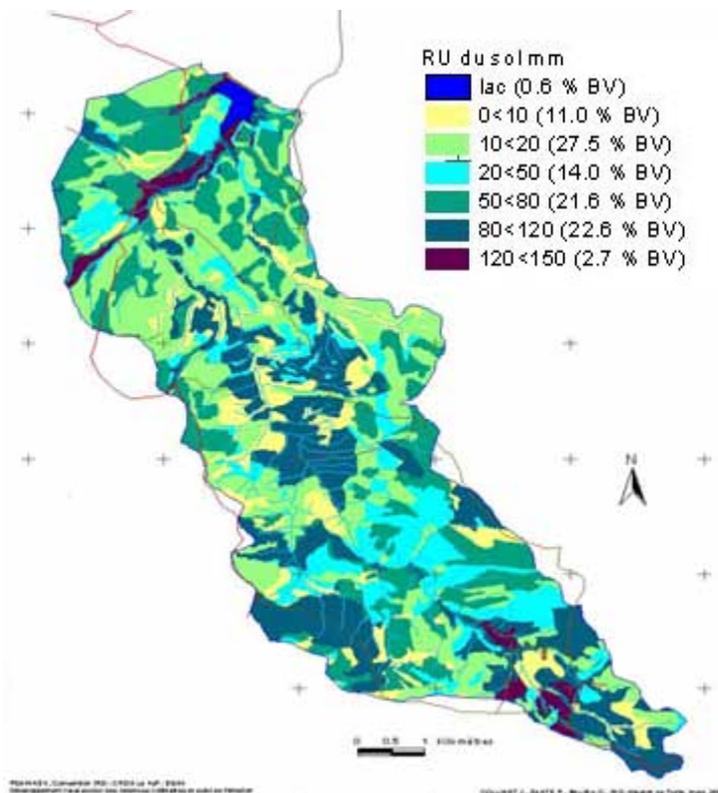
**Cuadro 15. Cálculo de las reservas hídricas útiles en la cuenca de Zanfour**

Los mapas de suelo a nivel de la cuenca y su incorporación a un SIG se utilizaron para elaborar espacialmente la información hidrofísica. La cuenca de Zanfour, que tiene un área de 42 km<sup>2</sup> y un embalse de 710.000 m<sup>3</sup>, forma parte de la red tunecina piloto de cuencas hidrológicas. Por este motivo resulta interesante calcular el ADT, simular diversos resultados según la precipitación anual, comparar la capacidad hídrica del suelo de la cuenca con los suelos de mayor capacidad de retención y simular las necesidades de riego en relación con los diversos tipos de cubierta.

Las profundidades, texturas y cantidad de materiales gruesos se obtienen a partir del mapa de suelo, mientras que los umbrales de humedad crítica del suelo para potenciales de 2,5 para la capacidad de campo y 4,2 para el punto de marchitez permanente, se calculan con el método de A. Bruand et al. (2002). Se elaboró un GIS (ArcView) para relacionar las unidades de suelo con las variaciones de profundidad, textura, elementos gruesos, humedad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y finalmente, contabilizar las isólineas y dibujar el mapa ADT (Figura 42). De entre todas las posibles simulaciones, se tomaron en consideración las siguientes:

- **Una simulación de la recarga parcial del ADT de los suelos de la cuenca**  
En 2001, con una precipitación de 350 mm, la recarga de las reservas del suelo se obtuvo por acumulación anual de volúmenes de diferentes clases. La recarga parcial de las reservas hídricas útiles de todos los suelos en la cuenca hidrológica proporciona una capacidad de almacenamiento de la cuenca hidrológica de 1,4 millones de m<sup>3</sup> (Tabla 9) que supone dos veces la capacidad del embalse.
- **Una simulación de la saturación ADT de los suelos de la cuenca**  
La comparación de las reservas insaturadas del año 2001 con las saturadas permite establecer los coeficientes de reducción de la columna 4 de la Tabla 9.

La recarga completa de las reservas hídricas de todos los suelos de la cuenca proporciona una capacidad de almacenamiento de 2,2 millones de m<sup>3</sup> que representan tres veces la capacidad de reserva de la presa. Con esta reserva y los resultados de 2001 (precipitación anual: P 350 mm, evapotranspiración de referencia del cultivo: 1.896 mm), se pudo calcular la precipitación anual teórica que permitiría llenar las reservas hídricas del suelo. Debería alcanzar un valor de 553 mm, a efectos comparativos, la precipitación anual media de la cuenca de Zafour es de 400 mm.



**Figura 45.** Mapa de isólineas de reserva hídrica útil del suelo RU. Fuente: Collinet et al. 2001.

**Tabla 9.** Reservas hídricas de la cuenca para saturación total y parcial del suelo.

UR promedio por clase (mm)	Área de cada clase (ha)	Saturación total UR x área (103.m <sup>3</sup> )	Coefficiente de reducción reserva/P acumulada	Recarga 2001 UR x área x coefic (103.m <sup>3</sup> )
5	481	24	0,29	7
15	1.202	180	0,51	92
35	609	213	0,63	134
65	943	613	0,65	398
100	988	988	0,65	642
135	117	158	0,65	103
total	4.340	2.176		1.376

Agua Disponible Total (ADT) mediante un coeficiente de utilización de estas reservas, por parte de una planta, cuyo desarrollo del sistema radical permitiese un uso progresivo de 100 cm de suelo no compacto. El uso de la profundidad del suelo accesible a las raíces representa un importante avance pero, ni proporciona información sobre las características físicas de los materiales que pueden controlar el volumen y el acceso a las reservas, ni sobre las posibilidades del ascenso por capilaridad desde un acuífero más profundo. Un ejemplo de los métodos usados para superar estas dificultades se presenta en el Cuadro 15, Tabla 9 y Figura 45.

Los resultados muestran la utilidad de los métodos que proporcionan valiosos datos cuantitativos espaciales para la gestión del agua en la cuenca, en particular con respecto a los cultivos de regadío y de secano según la precipitación y el agua almacenada en la presa y, así, permite equilibrar las aguas verdes y azules.

---

Los efectos del cambio en la cubierta forestal, incluyendo el bosque, y de las técnicas de conservación de suelo y agua se pueden predecir en base a los cálculos de la erosión laminar y embarrancamiento y del uso de técnicas de simulación.

---

En los próximos párrafos se presentan tres ejemplos de cómo el progreso científico puede mejorar la gestión del agua en relación a la erosión del suelo. Estos ejemplos emanan de la investigación llevada a cabo en la cuenca del Abdessadok, que presenta las siguientes características: 307 ha, con una capacidad inicial de reserva de 92.500 m<sup>3</sup>, una capacidad en 2001 de 65.000 m<sup>3</sup> debido a la colmatación específica de 10.6 m<sup>3</sup>/ha/año como consecuencia de que un 50% de la cuenca se usa para la agricultura (cultivo de cereal de bajo rendimiento + cría extensiva de ganado ovino en las pendientes).

- a) Se analizó y cuantificó la erosión de las laderas asociadas a los diferentes usos del suelo de la cuenca, tanto en parcelas experimentales, como a escala de toda la cuenca. El análisis del comportamiento de las parcelas a gran escala ha permitido entender el fenómeno a menor escala (cuenca) y, en particular, distinguir la transición entre erosión areolar a erosión lineal hasta los embarrancamientos. Los modelos estadísticos como el RUSLE2 (ecuación universal de pérdida de

### Cuadro 16. Cálculo de la erosión desde la construcción de la presa (1993 a 2001)

El modelo ha dado las siguientes erosiones generales:

- a) 1,75t/ha/año en un año seco que se ha calculado con un índice de precipitación  $R_{si} = 25 \text{ Mj.mm/ha.h}$
- b) 4,12t/ha/año en un año medio con un  $R_{si} = 64 \text{ Mj.mm/ha.h}$
- c) 6,03 t/ha/año en un año húmedo con un  $R_{si} = 93 \text{ Mj.mm/ha.h}$

Parece que las tormentas fuertes (superiores a 50 mm por día y con elevada intensidad, por encima de 90 mm/h durante 5 minutos) a pesar de ser excepcionales afectan de un modo importante a estas estimaciones calculadas a durante largos períodos de tiempo. El año 1994–95 resultó ser particularmente agresivo, con un índice de anual de precipitación calculado en 276 episodios de lluvia (intensidad calculada cada 30 minutos) con 219 episodios durante el mes de octubre de 1994, un período de alta vulnerabilidad del suelo debido al arado de la tierra : el cálculo de la erosión total, ponderada por área y con un índice de suelo desnudo ( $C=1$ ) durante la temporada de arado, da 22,5 t/ha/año que es suficiente para explicar la colmatación previamente observada.

### Cuadro 17. Simulación de reforestación con pino carrasco de matorrales de cabecera sobre suelos calcáreos (litosoles)

La primera simulación se centró en la reforestación, con pino carrasco, de las vertientes pronunciadas (pendiente > 25%) en suelos pedregosos y someros (litosoles sobre suelo de la unidad 3 y regosoles sobre suelos de la unidad 7). En lugar de esperar 20 años a que crezca el bosque y observar cómo mejora la protección de la cuenca, la simulación permitió detectar un incremento de la protección en un 12% (Figura 45). Se deberían considerar otros factores como el incremento de la reserva hídrica (como se observó en la cuenca de Zanfour), la disponibilidad de madera y leña – bienes esenciales para la comunidad rural de la cuenca - así como los beneficios relacionados con la reducción de la erosión.

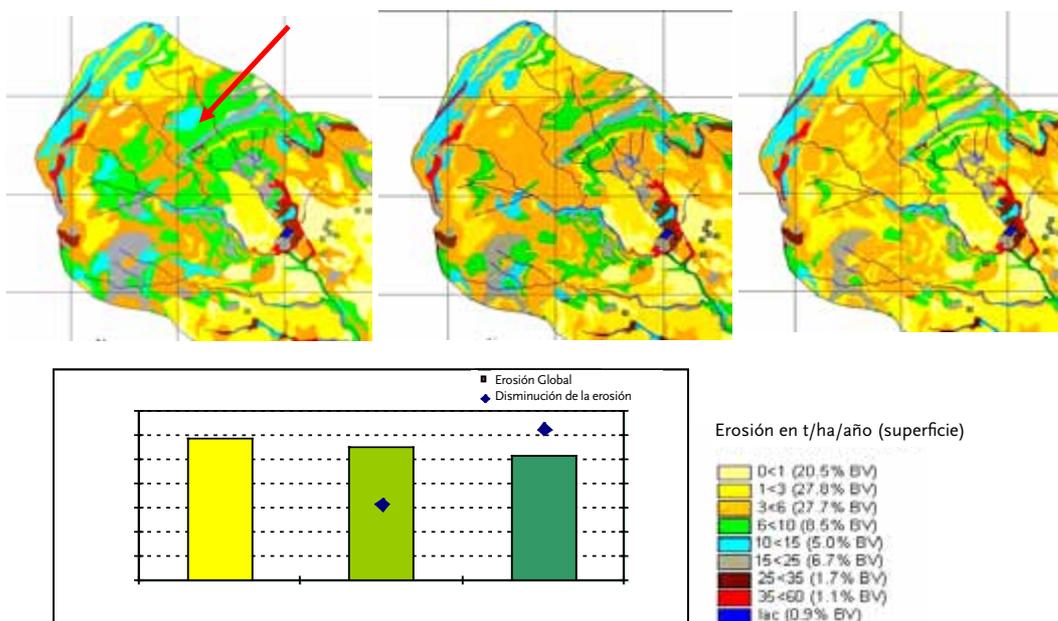


Figura 46. Cuenca de Abdessadok (parcial), control de la erosión al reemplazar los matorrales (izquierda) en los litosoles de la cabecera por un bosque joven (centro) que madura (derecha).

### Cuadro 18. Simulación de la retirada de los aterrazamientos

Esta simulación analizó los efectos de la eliminación total de los aterrazamientos a ambos lados del río. Esta eliminación aumentaría en un 30% la erosión total de la cuenca (Figura 47). Retirando sólo las terrazas del margen derecho o sólo las del izquierdo, se obtiene como resultado que sus efectos protectores varían significativamente, dependiendo de los márgenes: el derecho parece ser más frágil puesto que los suelos desnudos ocupan un área mayor y las pendientes son más pronunciadas.

suelo revisada-versión 2) de G.R. Foster, permiten aplicaciones en pendientes de geometría compleja. Se aplicaron y combinaron con GIS en diferentes cuencas de Túnez (ver Cuadro 16). Los resultados se han comparado con la colmatación de los embalses de vertiente, y muestran que los métodos usados para simular la erosión del suelo concuerdan con las observaciones reales y que pueden ofrecer valiosos datos para mejorar aún más el uso del suelo y las técnicas agrícolas.

- b) La cubierta vegetal influencia los procesos del agua y de erosión del suelo (ver capítulos 1 y 2). Por lo tanto, al diseñar planes para la gestión de las cuencas, es importante predecir las consecuencias sobre la erosión del uso de ciertos tipos de cubiertas en determinadas partes de la cuenca. Puesto que la experimentación es un proceso largo (¡especialmente si hay que plantar un bosque!), unas técnicas de modelización robustas pueden ofrecer excelentes alternativas. En la misma cuenca del Abdessadok, esos métodos se han aplicado con éxito tal y como se aprecia en el Cuadro 17. Los resultados muestran que sustituir algunas unidades de vegetación arbustiva por superficies plantadas de pino carrasco reduciría las pérdidas de suelo y la colmatación de las presas, aparte de suministrar otros bienes.
- c) Además de las presas, la gestión de las cuencas a menudo incluye aterrazamientos para la retención de agua y suelo en ambas riberas del río mientras fluye a través del glacis cultivado. Las técnicas de modelización pueden simular los efectos de la ausencia o la retirada de estos aterrazamientos. Algunos resultados de

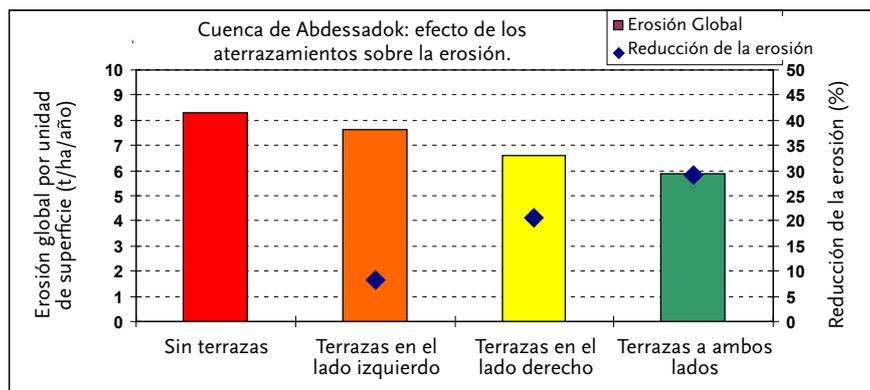


Figura 47. Cuenca de Abdessadok: Cambio de la erosión como resultado de la retirada parcial o total de los aterrazamientos en el tramo bajo de la cuenca.

simulaciones llevadas a cabo en la cuenca del Abdessadok se pueden ver en el Cuadro 18. Muestran que, mientras las terrazas juegan un papel significativo en la reducción de la erosión, su eficiencia protectora difiere en función del suelo y su cubierta.

Es conveniente afinar el sentido crítico ante un modelo que es más estadístico que físico. El modelo usado presenta varios términos multiplicativos que no explican la falta de linealidad entre factores, pero los cálculos de la erosión en los cuatro estudios anteriores en cuencas de áreas equivalentes producen resultados que concuerdan con los valores medidos por la batimetría en los embalses de ladera.

Esta concordancia se debe, probablemente, al hecho de que el sedimento que se produce en los diferentes segmentos de las pendientes se transportan totalmente a la presa sin sedimentación intermedia –puesto que las pendientes son cortas y, generalmente, muy pronunciadas, los flujos de agua mantienen su capacidad de transporte, dada su velocidad y el fino tamaño de los elementos que transporta. La erosión total calculada según su peso también confirmó unos resultados razonables del modelo. Las simulaciones acaban dando una valoración apropiada de los efectos de cualquier cambio propuesto incluyendo la reforestación, en las áreas con recurso hídricos apropiados para el establecimiento de las plántulas. Un caso específico que no se ha cubierto en los estudios de los que hemos hablado se refiere a las cuencas que están parcial o totalmente sobre margas y que, por ello, son especialmente propensas al embarrancamiento. En estas condiciones, la erosión puede ser entre 10 y 100 veces superior a la erosión laminar calculadas en los modelos anteriores.

### Lecturas recomendadas

- Albergel, J. and Rejeb, N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. Pp.77–88.
- Bruand, A., Perez Fernandez, P., Duval, O., Quetin, P., Nicoullaud, B., Gaillard, H. and Raison, L. 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols, utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *EGS / AFES* 9(2) 105–125.
- Collinet J., Zante P. and Ghesmi M. 2001. Cartographie des risques érosifs sur le bassin versant du barrage collinaire de Zanfour (nord dorsale tunisienne). Pour la convention CRDA Le Kef / ESAK / IRD dans le cadre du Programme: Développement durable autour des retenues collinaires et suivi de l'érosion., Mission I R D de Tunis. 60 p.
- Hentati, A., Kawamura, A., Amaguchi, H. and Iseri Y. 2010. Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. *Geomorphology* 122: 56–64.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., McCool, D.K., Weesies, G.A., Toy T.J. and Wagner L.E. 2001. The Design Philosophy Behind RUSLE2: Evolution of an Empirical Model. Pp. 95–98. In: *Soil Erosion Research for the 21st Century*, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA). Eds. J.C. Ascough II and D.C. Flanagan. St. Joseph, MI: ASAE. 701P0007.

## Hacia una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica integrada

**Bart Muys, Paolo Ceci, Thomas Hofer y Claudia Veith**

**E**ste capítulo pretende ensamblar las discusiones de los diferentes sectores en las anteriores secciones, tratando el tema de “agua para los bosque y las personas del Mediterráneo” desde una perspectiva holística. Tal y como el título sugiere, tal enfoque implica aspectos hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos.

Debido a la falta de sostenibilidad del consumo de agua y a los impactos del cambio climático, la escasez de agua se está convirtiendo en un problema enorme en el Mediterráneo. Los conflictos de intereses entre la cabecera y el tramo bajo, y entre áreas urbanas y rurales, muy probablemente empeorarán puesto que los costes de gestión de la protección del agua, tratamiento de aguas urbanas y del control de la contaminación crecen. Es más, puesto que los bosques son los principales consumidores de agua, la discusión sobre el compromiso entre disponibilidad reducida de agua y los servicios proporcionados por los ecosistemas merecerá cada vez más atención. Este capítulo argumenta que las soluciones sostenibles requieren la integración de intereses diversos y la colaboración de todos los participantes involucrados. Resulta necesaria una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica integrada para asegurar la provisión continuada de suficientes recursos hidrológicos y de otros servicios medioambientales.

---

El **paradigma del agua azul** se basa en la evaluación de los efectos de los bosques y otros usos del suelo y de la gestión, sobre la disponibilidad de recursos de agua azul para uso humano; esta evaluación se puede llevar a cabo tanto con modelos hidrológicos como con indicadores relevantes de las políticas aplicadas.

---

En los últimos años, el papel de los bosques y de su gestión en el ciclo del agua ha despertado gran controversia. Hasta hace poco, existía la creencia común, entre los silvicultores, de que los bosques tienen un efecto benéfico sobre los flujos del agua, incluyendo el control de la erosión, amortiguando los picos de crecida y los caudales de base (ver secciones 1.5, 2.2.). Esta interpretación tuvo su *momentum* tras los programas de aforestación a gran escala y de restauración forestal en el área mediterránea en la segunda mitad del siglo XX, y se basó en parte en ideas falsas como el modelo “esponja” que aún se enseña. La investigación hidrológica, especialmente en cuencas experimen-

tales pareadas, apunta hacia un descenso significativo del caudal de base tras la aforestación con pinos o eucaliptos, especialmente en áreas con escaso excedente de precipitación (precipitación menos evapotranspiración real).

Estos hallazgos dan soporte al denominado **paradigma del agua azul**, según el cual, el efecto de los bosques y de otros usos del suelo sobre el ciclo del agua se evalúa en términos de disponibilidad de agua azul para uso humano. Los métodos actuales de evaluación del impacto sobre el medio ambiente normalmente se enfocan desde el punto de vista del agua azul. La mayoría necesitan la calibración completa de un modelo hidrológico de la cuenca en cuestión, lo que resulta tedioso y exige abundantes datos. Para evitar este cuello de botella, los científicos evaluaron hasta qué punto resulta posible transferir los parámetros de los modelos, de una cuenca a otra. Una manera elegante de extraer **indicadores relevantes del impacto de la gestión del suelo sobre los recursos de agua azul** –bien directamente, a partir de medidas del caudal fluvial o bien de resultados modelizados– es el enfoque del **balance hídrico regional** propuesto por algunos investigadores en el que el riesgo de inundación se define como el percentil 0,95 de los datos de caudal diario; el **riesgo de sequía** como el percentil 0,05 de los datos del caudal mensual; y el promedio de **disponibilidad hídrica** como la mediana de los mismos valores mensuales (Figura 48). Para comparar indicadores de los sistemas de gestión del suelo entre cuencas con diferentes climas u otros factores propios de cada lugar, los indicadores se normalizan con un valor de referencia, que es el valor de la Vegetación Potencial Natural (VPN) – el ecosistema terrestre que se desarrollaría en la cuenca a largo plazo sin la intervención humana.

El paradigma del agua verde – además del paradigma del agua azul – debería ser objeto de mayor atención puesto que los flujos de agua verde preservan las principales funciones de los ecosistemas.

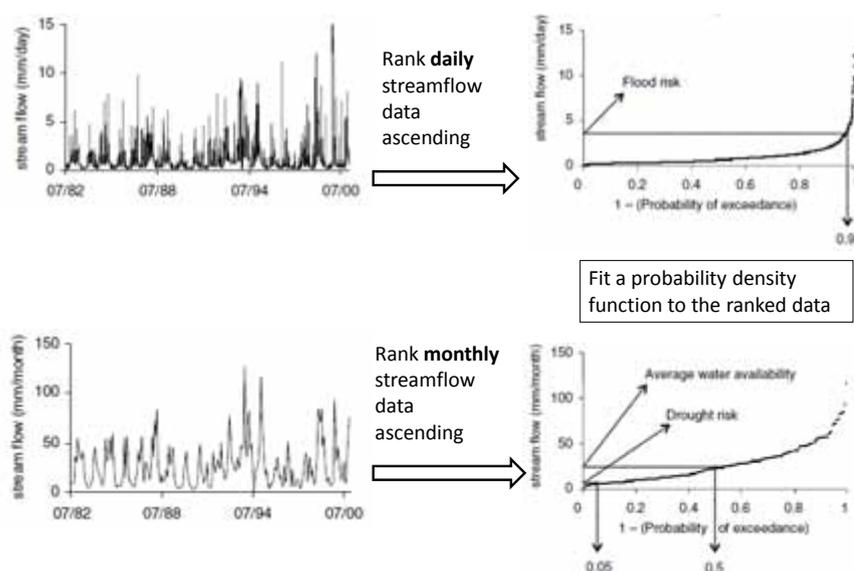
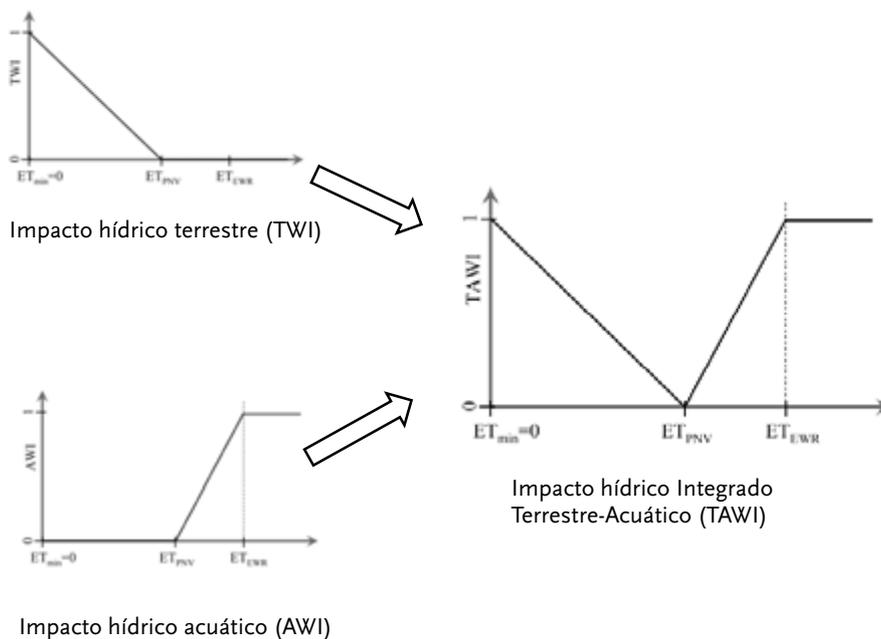


Figura 48. Cálculo de indicadores simples de agua azul para evaluar el efecto del uso del suelo sobre las inundaciones y riesgo de sequía, y el promedio de disponibilidad hídrica en el tramo bajo de una cuenca. Fuente: Heuvelmans et al. 2005.

A pesar de la gran relevancia del paradigma del agua azul, la evapotranspiración, como principal factor del crecimiento de la planta y del control interno del ecosistema sobre los flujos de energía y materia, parece haber perdido importancia, mientras que las recientes investigaciones sobre ecosistemas hacen más énfasis en el papel clave del flujo de agua verde para el funcionamiento y estabilidad de los ecosistemas terrestres. En particular, los bosques tienen una mayor capacidad para evapotranspirar que otros tipos de vegetación terrestre gracias a la profundidad de sus raíces y al elevado índice foliar de los árboles. El enraizamiento profundo mejora la disponibilidad hídrica para todo el ecosistema por la asimilación y la ascensión hidráulica, a la vez que los elevados índices foliares en dosel multicapa contribuyen al control de la erosión, tanto por la disipación de la energía cinética de la precipitación, como por la reducción, por intercepción, del agua que llega al suelo (ver sección 1.5). La estructura del dosel y la evapotranspiración, dan origen a un microclima estable, condición necesaria para la conservación de la biodiversidad relacionada con el bosque. Estos hallazgos sostienen un **paradigma del agua verde**, que considera que los flujos de agua verde contribuyen sustancialmente al mantenimiento de bosques como sistemas complejos auto-organizados con una gran capacidad de recuperación tras las alteraciones.

El desafío de integrar los intereses de la cabecera y del tramo bajo, incluyendo ecosistemas terrestres y acuáticos, se puede afontar reconciliando el paradigma de agua azul y verde. En la práctica se puede lograr mediante el uso de modelos específicos como el indicador acuático-terrestre del impacto sobre el agua.



**Figura 49.** Impacto integrado de la gestión del suelo sobre los servicios de ecosistemas terrestres y acuáticos en una cuenca (TAWI) como una función de la evapotranspiración real (ET). Los límites se determinan por la evapotranspiración de la vegetación natural potencial y de los requisitos hídricos del ecosistema (ETEWR). Fuente: Maes et al. 2009.

Cada vez resulta más evidente que las fracciones de agua verde y azul sostienen importantes servicios de los ecosistemas: la fracción de agua verde, principalmente en la cabecera del sistema terrestre, y la fracción de agua azul, principalmente en el tramo bajo del río. La cuestión es cómo evaluar la gestión del suelo desde un **enfoque integrado acuático-terrestre**, teniendo en cuenta sus impactos en las funciones de soporte vital y en los servicios de los ecosistemas, tanto en la cabecera como en el tramo bajo. Algunos científicos proponen el método del indicador acuático-terrestre del impacto sobre el agua (TAWI), evitando el ejercicio de calibración complejo, que requiere abundantes datos, de los modelos de cuencas. El indicador de impacto usado es la evapotranspiración real (ETR) del sistema. Su impacto sobre los servicios del ecosistema terrestre se define por una simple función de respuesta formada por un componente de impacto terrestre, que sigue un descenso lineal del impacto entre cero y la evapotranspiración de la vegetación natural potencial ( $ET_{VPN}$ ), y un **componente del impacto acuático** que sigue un aumento lineal entre  $ET_{VPN}$  y el nivel de evapotranspiración que reduciría la descarga total a niveles críticos por debajo del requerimiento hídrico medioambiental ( $ET_{EWR}$ ) (Figura 49).

El **requerimiento hídrico medioambiental**, o caudal mínimo, es un valor específico de cada cuenca para cuya determinación existen métodos de cálculo estandarizados. La conversión en de un bosque seco en una plantación de eucalipto, por ejemplo, llevaría a un aumento de la ET por encima del umbral de la  $ET_{VPN}$  y causaría un cierto impacto en el componente acuático del TAWI, mientras que la degradación del mismo bosque seco por sobrepastoreo o fuegos inducidos por el hombre, conduciría a un descenso de la ET por debajo del umbral  $ET_{VPN}$  y podría causar un impacto similar, pero a través del componente terrestre del TAWI. A mayor disponibilidad de datos el cálculo puede ser más realista, por ejemplo, definiendo el máximo impacto terrestre en el nivel de evapotranspiración de una superficie asfaltada, en lugar de cero, o definiendo la evapotranspiración de la VPN teniendo en cuenta los ciclos de perturbación naturales en un bosque no gestionado.

---

La integración del agua con otros servicios ecosistémicos se debería basar en una mayor comprensión de cómo interactúan los servicios entre sí.

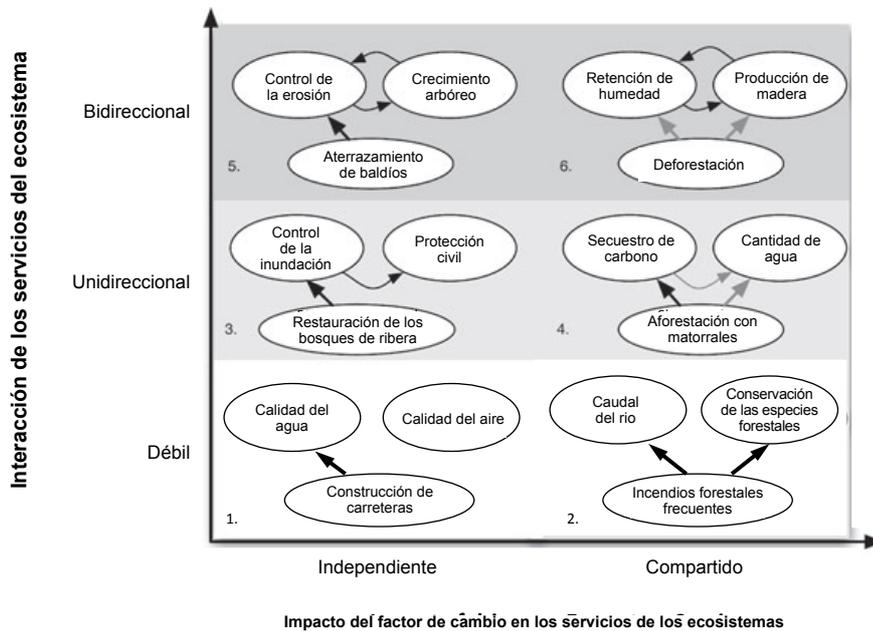
---

La regulación del agua es una función importante, aunque no exclusiva, de los bosques. El bosque mediterráneo es importante por otros muchos **servicios ecosistémicos (ES)**, por ejemplo la conservación de la biodiversidad (servicio de soporte), recolección de setas y de resina (servicios de aprovisionamiento), y de recreo (servicio cultural)(ver secciones 3.1, 4.2). Estos servicios interactúan todos de diferentes maneras en el tiempo y en el espacio. A primera vista pueden ser sinérgicos (por ejemplo, el flujo de agua verde y el secuestro de carbono), o antagónicos (por ejemplo, el flujo de agua verde y el recreo acuático). La Figura 50 ilustra las posibles **interacciones** entre el agua y otros ES en los bosques mediterráneos.

---

Con respecto a la integración del agua con otros servicios de los ecosistemas, existen nuevas herramientas para analizar los compromisos y la optimización de la gestión del suelo.

---



**Figura 50.** Ejemplos de posibles interacciones entre el agua y otros servicios de los ecosistemas en el bosque mediterráneo, añadidos al esquema conceptual de Bennett *et al.* (2009). El agua se relaciona con otros servicios del ecosistema debido a su respuesta (independiente o compartida) al mismo motor del cambio (clima, gestión del suelo), o debido a la interacciones (débiles, unidireccionales o bidireccionales) con otros servicios. Las flechas negras indican efectos positivos; las grises, efectos negativos.

Existen diferentes modos de evaluar las relaciones entre los servicios de los ecosistemas. Un enfoque simple pero sólido para relacionar el agua con otras funciones forestales es el **análisis de la relación**. La relación que representa la transpiración respecto de la productividad primaria neta, por ejemplo, es un indicador clásico de la productividad hídrica de los cultivos agrícolas, pero resulta igualmente útil en silvicultura (ver 4.5 sobre la huella hídrica). Las proporciones se pueden usar para calcular el coste en términos de consumo de agua verde para cualquier servicio del ecosistema forestal, por ejemplo, la evapotranspiración, en mm por tonelada de reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Un enfoque diferente lo constituye el **análisis del compromiso**, en el que los gestores de paisaje y bosque buscan específicamente ES que presenten interacciones antagonistas, por ejemplo, un aumento de la producción de madera a expensas de una disminución de la descarga total de agua. Para poder entender mejor su estructura espacial se puede trazar un mapa de tales compromisos. Las interacciones de múltiples funciones de los bosques prácticamente no se han explorado. El uso de técnicas de **modelización empíricas** avanzadas resulta prometedor para detectar los **grupos de ES**, que se refieren a conjuntos de ES que están relacionados unos con otros y que aparecen juntos en el paisaje repetidamente, a través del tiempo y del espacio mostrando un comportamiento paralelo. Detectar estos grupos ligados a los temas del agua de los bosques facilitaría el diseño de sistemas de gestión polivalente. La interacción entre múltiples ES como la recarga de agua subterránea, su calidad y el secuestro del carbono, también se pueden abordar usando **modelos mecanicistas de ecosistemas** dado que los procesos de evapotranspiración, fotosíntesis y reciclado de nutrientes que sustentan la actividad de los ecosistemas, están interrelacionados. Añadir una interfaz al usuario y algunas fun-

### Cuadro 19. Gestión medioambiental y socioeconómica integradas en Italia

Dos tercios de Italia son áreas montañosas. A finales de los 90 Italia desarrolló pactos territoriales (Leyes Nacionales números 104 de 1995 y 662 de 1996) que regulan los contratos destinados a la planificación, entre grupos sociales. Estos pactos son acuerdos públicos y privados para poner a punto medidas de desarrollo local que integren la gestión de los recursos naturales, industria, agricultura, pesca, servicios públicos, turismo e infraestructuras. Cualquier área puede tener un pacto, pero las marginales tienen prioridad. Los pactos territoriales incluyen ya al 47% del total de la población de Italia y cubren el 53% de su suelo. El pacto usa un enfoque integrado intersectorial y el hecho de que involucre actores clave hace que resulten relevantes para la gestión de la cuenca hidrológica.

La característica principal de los pactos es que armonizan diferentes actores locales sin imponer condiciones externas; la participación es voluntaria e incluye a todos los sectores: administración, empresas, banca, investigación y comercio, etc. El objetivo de un pacto territorial es conseguir cohesión entre las nuevas iniciativas y las actuales que afecten a los recursos naturales, las personas y las actividades económicas. Cada pacto abarca actividades específicas, como la gestión de los recursos naturales, incluyendo los recursos hídricos –más de la mitad de los pactos aprobados hasta el 2003 incluyen aspectos hidrológicos y recursos naturales-. El territorio cubierto por un pacto puede variar desde una pequeña cuenca hidrológica a los 1.600 km de los Apeninos.

El pacto territorial de la provincia de Rieti, por ejemplo, incluye 12 municipios, tres comunidades de montaña y 35 partes firmantes. Ha creado 227 nuevos empleos a jornada completa, y ha usado 18 millones de euros para dos actividades principales: desarrollo y refuerzo de capacidades en pequeñas y medianas empresas e investigación en infraestructura, turismo y servicios medioambientales, incluyendo agricultura y silvicultura.

El pacto territorial proporciona un marco para la acción y ventajas de la economía de escala con dimensión humana y cultural que influyen enormemente su capacidad de éxito.

cionalidades de automatización y visualización, puede convertirlos en poderosos **simuladores** de la función e interacción de los servicios de los ecosistemas.

Entender los compromisos entre ES una excelente base para la **gestión integrada y sostenible del paisaje**. Cualquier opción de gestión seleccionada por planificadores del paisaje y propietarios y gestores forestales tendrá efecto sobre el tipo, la magnitud y la mezcla relativa de ES proporcionados por el paisaje forestal. **La optimización de la gestión** es una tarea compleja, como cualquier otra opción, puede sacrificar parte de un ES para mantener otro ES. Se han desarrollado diversas **técnicas multi-objetivo de planificación de la gestión del paisaje**, incluyendo el análisis multi-criterio con coeficientes de valoración asignados por los grupos interesados, la programación lineal y la programación de objetivos; así mismo se han desarrollado procedimientos heurísticos para este propósito, específicamente para problemas espaciales. Ayudan a encontrar soluciones de gestión óptimas basadas en reglas de decisión múltiple. También resulta posible una optimización económica para identificar el beneficio neto social más alto para el área en cuestión. Un enfoque coste-beneficio asume que existen métodos para asignar valor económico a cada uno de los beneficios considerados, incluyendo los que no se comercian en el mercado. Aún existe una clara necesidad de desarrollar más e integrar esos enfoques en **sistemas de soporte de decisión espacial** para una gestión de los recursos hídricos y unos bosques sostenibles en la región mediterránea.

---

**Integrar una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica es un enfoque clave hacia la sostenibilidad.**

---

## Cuadro 20. Recomendaciones para una gestión sostenible de bosques y agua en el Mediterráneo

- Las áreas de suministro hídrico importantes y los acuíferos subterráneos deberían ser tenidos en cuenta para conservar los bosques con una perturbación mínima. A pesar de que la tala (de al menos el 20% del dosel) produce un aumento temporal de la disponibilidad de agua, existen compromisos, como la reducción de la calidad del agua, el aumento de la erosión y el impacto sobre la biodiversidad, que deben ser considerados. La extracción de cualquier producto forestal de estas áreas, debería hacerse evitando la compactación del suelo y la exposición de suelo desnudo para minimizar la escorrentía superficial y la erosión que conlleva. Los suministros de agua potable de las cuencas hidrológicas deberían tener un estatus legal como áreas protegidas o ser designadas como bosques protectores.
- En algunos casos, que se deben valorar cuidadosamente, el aprovisionamiento de las aguas de las cuencas municipales se puede aumentar con especies de árboles de bajo consumo que reemplacen a los de consumo más elevado o cuando en las parcelas se producen talas periódicamente.
- Las autoridades planificadoras deberían identificar las áreas con tendencia a sufrir deslizamientos y garantizar la conservación del bosque o su destino a un uso agroforestal/silvopastoral con cubiertas arbóreas densas. Esas áreas podrían, considerarse como parte del bosque público protector.
- Los bosques de ribera pueden mantener bajos aportes de sedimento a los ríos, lagos y embalses. Por lo tanto, deberían ser gestionados para proteger la calidad del agua que, a su vez, puede mejorar la capacidad productiva de los ecosistemas acuáticos y mejorar la salud y bienestar de las poblaciones humanas locales. Es recomendable que los países mediterráneos lleven a cabo una evaluación de sus zonas de ribera clave y las clasifiquen con miras a la gestión de conservación, protección o restauración. También se debería establecer una adecuada legislación sobre el mantenimiento de la zona de amortiguación de las riberas.
- Las cuencas forestales de montaña de la región mediterránea merecen especial atención. Son el origen del agua dulce pero, a la vez, también son fuentes de desprendimientos, aguas torrenciales e inundaciones. Las acciones para prevenir o mitigar los desastres en terreno montañoso deberían incluir el mantenimiento de una cubierta forestal sana en las cuencas forestales que están sujetas a lluvias torrenciales. La gestión del riesgo de desastres, del mismo modo que los recursos hídricos y la gestión de los bosques, deberían depender de una autoridad única para asegurar su adecuada integración. El Cuadro 21 describe la importancia del desarrollo sostenible de la montaña en la región mediterránea.
- Se debería incorporar a la gestión de los bosques y de los recursos hídricos, así como en la planificación de las zonas urbanas y agrícolas, una perspectiva de cuenca que considerara las relaciones entre la cabecera y el tramo bajo. Esta perspectiva resulta necesaria tanto a nivel local como al más alto nivel gubernamental para promover soluciones sostenibles.
- El pago por los servicios medioambientales tienen un potencial significativo y debería ser explorado en profundidad. Reduciendo los subsidios hídricos y tratando el agua como un bien no gratuito, los incentivos económicos pueden ayudar a una mejor gestión. Este es, en última instancia, un tema gubernamental, que supone el desarrollo de los acuerdos institucionales necesarios.
- Resultan necesaria la ampliación de programas educativos y de formación de la gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica integrada, dirigidos a todos los sectores implicados relevantes, – desde los habitantes locales de las cuencas hasta los políticos del más alto nivel.

Para mejorar el equilibrio entre el suministro y la demanda de agua, reducir la presión sobre el medio ambiente y abordar temas sociales y económicos, se requiere ligar la gestión del agua a la gestión integral de los recursos naturales. Puesto que el agua es un recurso escaso y amenazado en la región mediterránea, la gestión de los recursos hídricos debería prestar especial atención a la reducción de pérdidas, al aumento de la eficiencia y arbitrar en la distribución de los recursos. Esto significa definir objetivos ambientales y sociales, distribuir roles y responsabilidades entre los sectores público y privado, des-

### Cuadro 21. La importancia de las montañas

Las montañas son los depósitos de agua del mundo. Juegan un papel clave en el ciclo del agua ya que ejercen influencia sobre el clima y los patrones de precipitación y modulan el régimen de escorrentía. En las regiones áridas y semiáridas, como la mediterránea, la proporción de agua generada en las montañas puede llegar a comprender hasta un 95% del total del agua dulce disponible en una cuenca. Puesto que la mitad de los países de la región mediterránea tienen, por lo menos, el 50% de su suelo clasificado como áreas de montaña, el desarrollo montano sostenible y las conexiones entre la cabecera y el tramo bajo, merecen especial atención.

Las condiciones climáticas extremas y las restricciones medioambientales, como los suelos frágiles y las laderas empinadas, son obstáculos de primer orden para el bienestar de las comunidades de montaña. Además, la alta demanda de recursos de la montaña por parte de los habitantes de las tierras bajas, y sus políticas centradas en las tierras bajas ignorando la vulnerabilidad y desventaja de las montañas, a menudo exacerba la presión humana y las perturbaciones medioambientales. La degradación de los ecosistemas de montaña, no sólo destruye la base del soporte de la vida de los habitantes locales, sino que además tiene un fuerte impacto sobre la situación del tramo bajo. Estos factores han conducido a una preocupación creciente sobre el desarrollo de políticas y estrategias a nivel nacional para el desarrollo sostenible y la protección de los ecosistemas de montaña y sus habitantes. Para poder gestionar los recursos montañosos de un modo sostenible, resulta necesario establecer las conexiones entre la cabecera y el tramo bajo y generar oportunidades equitativas para el desarrollo y conservación sobre grandes territorios que se puedan extender desde la cumbre de una cadena montañosa hasta la costa, y sobre cuencas hidrológicas completas que pueden, incluso, atravesar fronteras internacionales.

centralizar la gestión y aumentar la participación de los agentes involucrados así como utilizar las herramientas técnicas y económicas adaptadas y más apropiadas.

La experiencia ha demostrado que las medidas puramente técnicas no resultan suficientes para abordar los problemas de las cuencas. Debido al papel fundamental de la población humana al dar forma a los paisajes y al asegurar ecosistemas equilibrados y sanos, las formas locales de ganarse la vida juegan un papel clave en la gestión integrada del agua y de los bosques. Allá donde la presión sobre los recursos resulta demasiado elevada y su uso insostenible, se deberían promover actividades alternativas para generar ingresos que redujeran la presión sobre los recursos del suelo. Estas intervenciones socioeconómicas requieren concienciación y fomento de la capacidad a diferentes niveles.

El éxito de la gestión integrada de bosques y agua necesita superar los límites sectoriales, institucionales y administrativos. Requiere de la participación de los diferentes agentes involucrados como silvicultores, agricultores, usuarios del agua, terratenientes, gobiernos locales e instituciones relacionadas. Puesto que la gestión de los recursos naturales siempre tiene un coste económico y social, es importante alcanzar un consenso sobre cómo compartir estos costes. La negociación, la mediación y el compromiso en el terreno político local, son elementos esenciales de la práctica de la gestión integrada que se dirigen mejor con un enfoque colaborativo, en el que los técnicos en recursos, los responsables de las tomas de decisiones de alto nivel, administradores locales y partes implicadas locales compartan las responsabilidades de evaluar la situación local y llevar a cabo las acciones necesarias, lo que exige tener muy claras las funciones de gestión y los derechos para un grupo dado de recursos naturales.

Uno de los principales objetivos de la gestión colaborativa es asegurar conexiones equilibradas y sostenibles entre la cabecera y el tramo bajo a escala de la cuenca y del paisaje.

Por ejemplo, el uso de los bosques de montaña se debe hacer compatible con la necesidad de provisión continuada de servicios ambientales esenciales como asegurar la calidad del agua, reducir la carga de sedimento en los ríos y garantizar el ocio. La experiencia sugiere que se consiguen conexiones equilibradas y sostenibles entre la cabecera y el tramo bajo de las cuencas, cuando existen políticas y mecanismos para amortiguar las desventajas socioeconómicas con las que las gentes de las tierras altas se suelen encontrar y cuando los sectores involucrados de las tierras bajas están dispuestos a pagar por los servicios medioambientales de las cabeceras y así contribuir a la mejora de las condiciones de vida de tierras altas. La gestión colaborativa de los recursos hídricos y forestales debe ser reforzada mediante políticas adecuadas, legislación e incentivos económicos.

Para abordar todos estos cambios, resulta necesaria una sinergia entre la comunidad forestal y la del agua mediante mecanismos institucionales dirigidos a poner a punto programas de acción a nivel local, nacional y regional. Del mismo modo, existe la necesidad urgente de un entendimiento mejor, y diferenciado a escala subregional, de las interacciones entre bosques y agua, particularmente en el contexto del cambio climático, y de inclusión de los resultados de las investigaciones en las políticas. También existe la necesidad de estrechar la colaboración entre las instituciones dedicadas a la investigación, la educación, financiera y políticas. Para un ejemplo concreto de la gestión socioeconómica y medioambiental integrada véase el Cuadro 19.

Suministrar agua en calidad y cantidad adecuada para cubrir las necesidades humanas resulta esencial y supone un reto, en particular en el área del Mediterráneo. Puesto que los bosques juegan un papel importante a este respecto, su gestión debe ir de la mano de la gestión hídrica. La elaboración de enfoques integrados requiere políticas e instituciones adecuadas para promover el diálogo y la cooperación intersectorial. Los programas forestales, hidrológicos y de uso del suelo se deberían basar en el rigor científico y no en percepciones erróneas. Los gestores forestales y de recursos hídricos, así como los responsables de la toma de decisiones en los sectores forestal e hidrológico deberían considerar y adoptar un conjunto de recomendaciones para proteger y mantener la preciada agua del Mediterráneo, como se detalla en el Cuadro 20.

### Lecturas recomendadas

- Benett, E.M., Peterson, G.D. and Gordon, L.J. 2009. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters* 12: 1394–1404.
- Dassonville, L. and Fé d'Ostiani, L. 2005. Mediterranean watershed management: overcoming water crisis in the Mediterranean. In: Tennyson, L. and Zingari, P.C.(eds.) *Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects. Water resources for the future. Proceedings of the International Conference. Porto Cervo, Sassari, Sardinia, Italy, 22–24 October 2003. Watershed Management and Sustainable Development Working Paper No. 9.* Rome, FAO, FORC.
- FAO. 2007. *Forests and water. Unasylva No. 229, Vol. 58(4).* Rome, FAO.
- FAO. 2006. *The new generation of watershed management programmes and projects. Forestry Paper No. 150.* Rome, FAO, FORC.
- Hamilton, L.S. 2008. *Forests and water: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005.* Rome, FAO, FOMC.
- Heuvelmans, G., Muys, B., Feyen, J. 2005. Extending the Life Cycle Methodology to Cover Impacts of Land Use Systems on the Water Balance. *International Journal of Life Cycle Assessment* 10: 113–119.
- Hofer, T. and Warren, P. 2007. *Why invest in watershed management?* Rome, FAO, FOMC.

- Maes, W.H., Heuvelmans, G. and Muys, B. 2009. Assessment of land use impact on water-related ecosystem services capturing the integrated terrestrial-aquatic system. *Environmental Science and Technology* 43: 7324–7330.
- Muys, B., Hynynen, J., Palahi, M., Lexer, M.J., Fabrika, M., Pretzsch, H., Gillet, F., Briceño, E., Nabuurs, G.J. and Kint, V. 2010. Simulation tools for decision support to adaptive forest management in Europe. *Forest Systems*, in press.
- Pukkala, T (ed.) (2002). *Multi-objective forest planning*. Kluwer Academic Publishers.
- Regato, P. & Salman, R. 2008. *Mediterranean Mountains in a Changing World: Guidelines for developing action plans*. Gland, Malaga, IUCN.
- Zingari, P.C. 2005. Effective watershed management: a European perspective. *In* M. Achouri and L. Tennyson, eds. *Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects*. Proceedings of the European Regional Workshop, Megève, France, 4 September 2002. *Watershed Management and Sustainable Mountain Development Working Paper No. 6*. Rome, FAO, FORC.

## La huella del agua en nuestra vida diaria: ¿cuánta agua utilizamos?

Yves Birot

---

El agua que utilizan las personas y la naturaleza tiene que ser gestionada de acuerdo con un enfoque que atienda a las múltiples necesidades de los antropoeosistemas. El análisis de la **huella hídrica** permite determinar, suministrar e identificar los impactos, y proporciona claras indicaciones sobre los riesgos y las responsabilidades.

---

**E**quilibrar el agua entre la naturaleza y los humanos supone que nosotros, como seres humanos y ciudadanos, somos conscientes de la cantidad de agua que utilizamos en cualquier recurso, que tiene una naturaleza finita y que debe compararse con los ecosistemas –ya sean terrestres o acuáticos. Este aspecto posee una dimensión temporal (entre y a lo largo de los años), otra espacial (desde la escala de cuenca a la escala de países y a escala global) y también una dimensión económica (comercio). Recientemente ha aparecido el concepto de **huella hídrica** con algunas similitudes (y discrepancias) con los conceptos de huella ecológica, huella del carbono y análisis del ciclo de vida (LCA), como una manera de abordar estos temas complejos.

La huella hídrica se puede valorar a nivel del **producto**, a nivel de su valor en la cadena o nivel **comercial** y al nivel **nacional** (relación entre consumo nacional, comercio y agua). En esta sección consideraremos principalmente los dos primeros niveles. Nosotros, como consumidores, también provocamos una huella hídrica.

La **huella hídrica de un producto** se puede definir como el volumen total de agua dulce utilizada para elaborar un producto a través de los diversos pasos de su cadena de producción. Hace referencia a cuándo y cómo se usa dicha agua (dimensiones espacial y temporal), así como el tipo de agua usada, verde (si procede de la lluvia evaporada), azul (el volumen de agua superficial o subterránea evaporado) o gris (volumen de agua contaminada durante el proceso<sup>1</sup>). En comparación con las estadísticas tradicionales sobre el uso del agua, que se refieren al consumo, el concepto de huella hídrica proporciona un modo más general de considerar la utilización del agua (ver Figura 51).

---

<sup>1</sup> El agua gris se cuantifica como el volumen de agua dulce necesario para diluir el agua por debajo de un umbral aceptable para las aguas ambientales.

## Cuadro 22. El concepto de huella hídrica tiene miras más amplias que el contenido de agua virtual

La huella hídrica es un concepto que se refiere al agua usada en la elaboración de un producto. En este contexto, podemos hablar también del “contenido de agua virtual” de un producto en lugar de su “huella hídrica”. Por ejemplo, podemos hablar de la huella hídrica de un consumidor contabilizando las huellas hídricas de los bienes y servicios consumidos; o de la huella hídrica de un productor (negocio, fabricante, proveedor de servicios) contabilizando las huellas hídricas de los bienes y servicios que producen. Es más, el concepto de huella hídrica no se refiere simplemente al volumen de agua, como en el caso del “contenido de agua virtual” de un producto. La huella hídrica es un indicador multidimensional que se refiere tanto al volumen de agua usada como a la identificación del lugar en el que se localiza la huella hídrica, qué fuente de agua se usa y cuándo se usa. Esta información adicional es crucial para poder evaluar el impacto de la huella hídrica de un producto. Fuente: Water Footprint: [www.waterfootprint.org/?page=files/FAQ\\_technical\\_questions](http://www.waterfootprint.org/?page=files/FAQ_technical_questions)

La huella hídrica es un indicador del consumo de agua que tiene en cuenta tanto el consumo directo como indirecto de un consumidor ó un productor. El consumo directo del agua se refiere al utilizado por el consumidor o el productor mismo. El consumo indirecto de agua se refiere al agua utilizada en la cadena de producción del producto ya elaborado que compra un consumidor o un productor.

En el caso de la **agricultura**, que tiene de lejos la mayor huella hídrica (70%) de todas las actividades humanas a nivel mundial, la huella hídrica se puede evaluar para el **cultivo** como consumo de agua en el cultivo ( $m^3/ha$ ) / rendimiento del cultivo ( $ton/ha$ ), y para los **animales** como la cantidad de agua que utilizan en comer, beber y otras necesidades.

Para cultivos o **productos** animales, el enfoque consiste en distribuir la huella hídrica del producto base entre sus productos derivados. Existen varios modelos, basados en datos climáticos y en las características del cultivo, que estiman las necesidades hídricas de los cultivos; resulta necesario aplicar una aproximación complementaria en el caso de irrigación, para el agua verde es decir, el volumen de precipitación que se evapora de un campo de cultivo durante el período de crecimiento) y el agua azul, es decir, el volumen de agua de riego, ya sea superficial o extraída del subsuelo, que se evapora del campo durante el mismo período.

---

Valorar la huella hídrica, de las materias primas, las actividades sectoriales o las cadenas de producción, abre nuevas perspectivas sobre los aspectos hídricos a diversas escalas (local, regional, nacional y global) y abre el camino a muchas aplicaciones relativas a la economía, comercio, medioambiente, políticas e industria etc.

---

Como ejemplo, la Figura 52 muestra la huella hídrica de España de varios cultivos que utilizan agua verde y azul, así como la productividad económica del agua usada. Aunque se trata de una simplificación, ya que agua azul y verde no tienen el mismo valor, este ejemplo ilustra la utilidad de esta aproximación a la hora de seleccionar políticas determinadas.

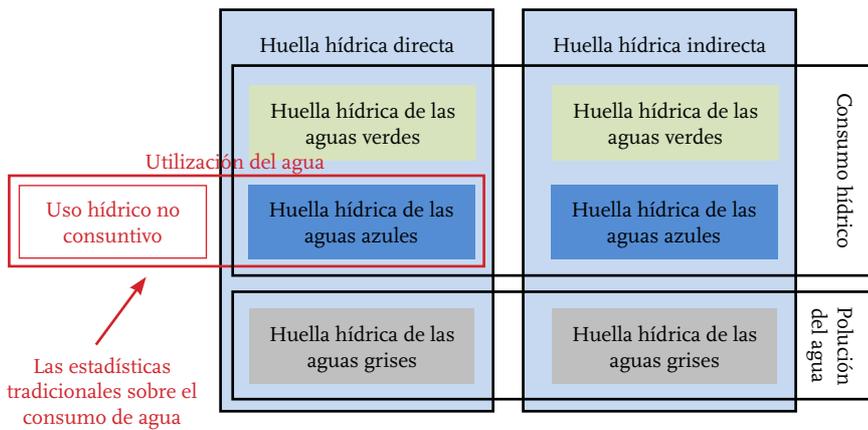


Figura 51. Componentes de la huella hídrica. Fuente: Hoekstra 2008.

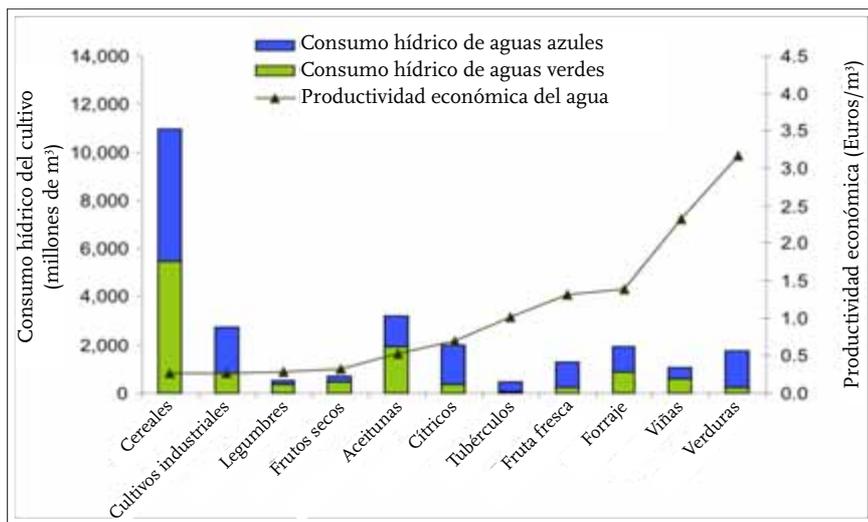
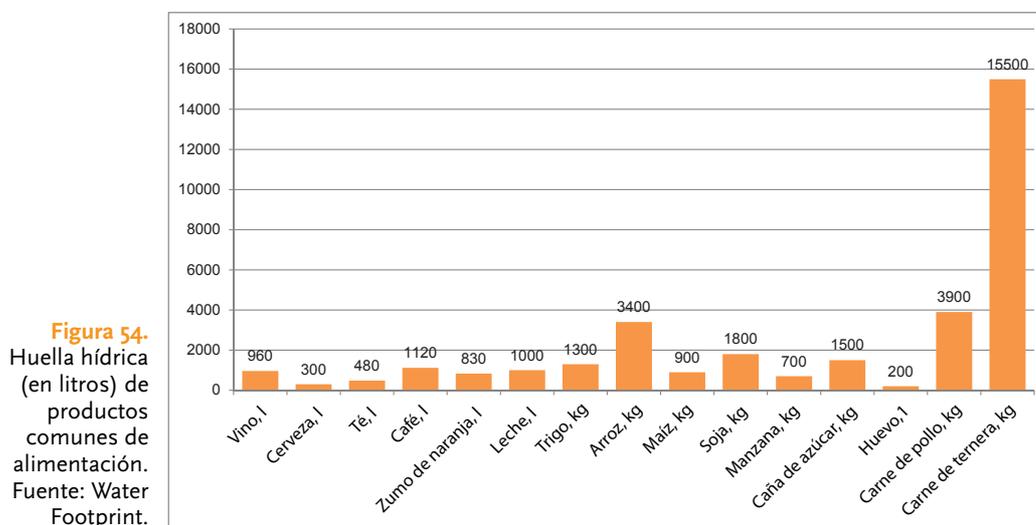


Figura 52. Productividad económica del agua (euros/m³) y consumo de aguas azules y verdes de los cultivos agrícolas en España durante 2006. Fuente: Garrido et al. 2009.

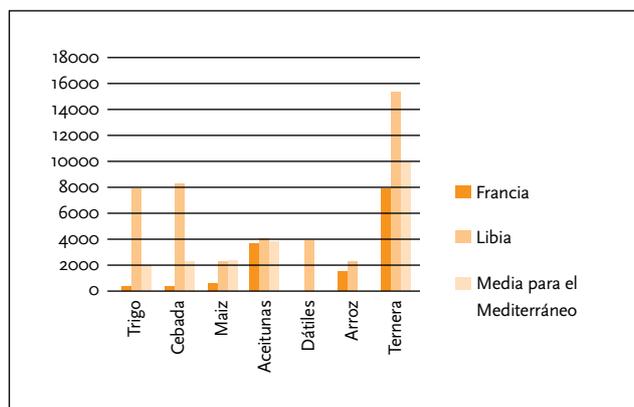
Otro ejemplo se relaciona con los aspectos espaciales. La huella hidrológica tiene una dimensión espacial, de modo que puede cartografiarse. Un mapa de la huella hidrológica muestra los volúmenes de agua consumidos en diferentes localizaciones, por ejemplo el agua consumida en todo el mundo para fabricar los bienes que consume una comunidad determinada (ver Figura 53). La huella hídrica permite vincular el consumo en un lugar con el impacto en el sistema hídrico de otro lugar. Es más, evaluar la huella hídrica permite identificar los “puntos calientes de las huellas hídricas” (en el tiempo y en el espacio); por ejemplo, cuando la huella hídrica (de un producto, consumidor o productor) es importante en un área dada y en un período del año, y en qué período el agua resulta escasa en dicha área



**Figura 53.** Impacto del consumo de productos del algodón por los ciudadanos en EU25 sobre los recursos hídricos mundiales (millones m<sup>3</sup>/ año) para el periodo 1997–2010. El mapa muestra la huella hídrica de las aguas azules, es decir el volumen evaporado de agua de riego. Fuente: Hoekstra y Chapagain 2008.



**Figura 55.** Contenido hídrico virtual por producto en litros/kilo en Francia, Libia y promedio para el Mediterráneo. Fuente: FAO, Hoekstra.



A la agricultura le corresponde la mayor huella hídrica. A escala mundial, la producción de alimento requiere, en promedio, 70 veces más agua que la que se necesita para el mantenimiento del hogar (50 l/persona/día). Para producir una dieta de 3.000 kilocalorías/persona/día (incluyendo un 20% de proteínas animales), resultan necesarios unos 3.500 litros de agua frente a los 50 l/persona/día para el mantenimiento del hogar.

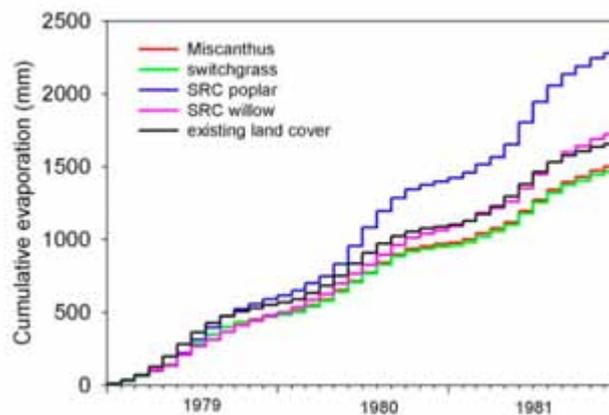
La Figura 54 muestra las huellas hídricas de algunos productos comunes, y cómo las preferencias alimenticias, como la dieta rica en carne que guarda relación con los ingresos, pueden tener un gran impacto sobre los recursos hídricos y por qué algunos cultivos (por ejemplo, el maíz) pueden no resultar adecuados en condiciones de escasez de agua.

Como ya se ha discutido, la huella hídrica de los productos alimenticios varía de acuerdo a las condiciones locales así como con los sistemas de cultivo y su eficiencia respecto del agua y la evapotranspiración potencial. La Figura 55 muestra alguna cifra para dos situaciones contrastadas (Francia y Libia) y para el Mediterráneo en general. Pone en evidencia que, para algunos cultivos, las diferencias son menores, mientras que en otros se dan enormes diferencias.

El agua no sólo está implícita en el alimento. También está implícitamente contenida en diversos productos de uso común y, a veces, en grandes cantidades (Tabla 10).

**Tabla 10.** Huella hídrica de algunos productos industriales (en litros)

Productos	Huella hídrica (l)
Hoja A4	10
Piel (1 kg)	16.600
Camisa de algodón (250 g)	2.700
Vaqueros (1.000 g)	10.800
Pañales (75 g)	800
Sábana (900 g)	9.700
Coche (1.1 t)	400.000–1.000.000
Casa (construcción)	6.000.000



**Figura 56.** Evapotranspiración acumulada de un monte bajo de corta rotación para la producción de combustible. Fuente: Finch 2008.

**Tabla 11.** Estimaciones de la huella hídrica de la madera basada en las tasas de crecimiento en la región mediterránea. La huella hídrica se expresa en m<sup>3</sup> de agua necesarios para producir 1 m<sup>3</sup> de madera. Nótese que la tasa de crecimiento de *Pinus radiata* puede ser 15–20 veces más elevada que la de *Quercus ilex*, lo que significa que el consumo de agua por hectárea resulta proporcional. Fuente: Gracia et al. 2000–2004, IEFC (Inventario Ecológico y Forestal de Cataluña).

Especies	Huella hídrica m <sup>3</sup> de agua/m <sup>3</sup> de madera
<i>Pinus radiata</i>	332
<i>Pinus pinaster</i>	698
<i>Abies alba</i>	762
<i>Pinus sylvestris</i>	1.443
<i>Pinus nigr</i>	1.458.
<i>Pinus pinea</i>	1.642
<i>Pinus uncinata</i>	1.708
<i>Pinus halepensis</i>	2.073
<i>Castanea sativa</i>	675
<i>Fagus sylvatica</i>	698
<i>Quercus ilex</i>	2.842
<i>Quercus suber</i>	2.981

Resulta relevante estudiar la **huella hídrica total tanto de los países como de sus ciudadanos**. Un estudio llevado a cabo durante el período 1997–2001 muestra que los EEUU presentan una huella media de 2.480 m<sup>3</sup>/persona/año (**6,8 m<sup>3</sup>/persona/día**), mientras que China tiene una huella hídrica media de 700 m<sup>3</sup>/persona/año (**1,9 m<sup>3</sup>/persona/día**). **La media global de la huella hídrica es de 1.240 m<sup>3</sup>/persona/año (3,4 m<sup>3</sup>/persona/día)**. Los cuatro principales factores directos que determinan la huella hídrica de un país son: su volumen de consumo (relacionado con la renta per capita); su patrón de consumo (por ejemplo: si el consumo de carne es alto o bajo); su clima (condiciones de crecimiento); y las prácticas agrícolas (eficiencia en el uso del agua de las técnicas de cultivo).

---

### Plantar árboles en el Mediterráneo para el secuestro de Carbono resulta altamente cuestionable a causa de su elevado coste hídrico.

---

El estudio de la huella hídrica no se ha aplicado mucho al sector forestal, aparte de la industria (pulpa y papel) y algunos tipos simples de cultivos intensivos de árboles que proporcionan productos químicos, fibras o bioenergía (Figura 56); a semejanza de la agricultura son cultivos de crecimiento rápido y consumen agua verde y azul. No obstante, existen algunos datos sobre la cantidad de agua necesaria para producir madera (Tabla 11). Esto trae a colación el tema del coste en agua (predominantemente verde) de la fijación de carbono en los bosques. A través de la fotosíntesis el carbono y el agua se interrelacionan íntimamente, y el coste en agua de la fijación del carbono es alto (ver capítulo 3). En condiciones de escasez de agua, como en el Mediterráneo, plantar bosques como “sumideros de carbono” resulta altamente cuestionable.

---

## Huella hídrica: un concepto interesante y una herramienta que debería combinarse con otros enfoques.

---

El concepto de huella hídrica ofrece una perspectiva interesante sobre los temas hídricos. En el contexto de una tendencia cada vez mayor hacia la gestión orientada a la demanda de los recursos hídricos, abre nuevas perspectivas de gestión y facilita la diferenciación y la compensación de las ventajas y desventajas entre las diferentes perspectivas, condiciones o intereses. Este concepto también permite hacer una distinción entre escalas –local, regional e incluso global– y sus conexiones. Así mismo resulta coherente con el planteamiento de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (IWRM) (ver sección 4.3.). Sin embargo asumir que el cambio de una actividad que requiere gran cantidad de agua, relacionada con cierto tipo de vegetación, por otra que requiera menos, permite aprovechar la diferencia de agua utilizada entre ambas no tiene por qué resultar ni cierto ni económicamente viable.

La huella hídrica es una herramienta que debe de utilizarse en combinación con otras al objeto de integrar todos los factores. Los bosques suelen ser consumidores netos de agua. En un enfoque integrado, se deberían tener en cuenta otros factores como: I) la limitación de la erosión del suelo por parte de la cubierta forestal, que contribuye a evitar la colmatación de las presas y a mantener la disponibilidad de agua azul, II) la infiltración y percolación del agua facilitada por el flujo cortical, el aumento de la materia orgánica del suelo y su permeabilidad debido al sistema radical de los árboles, que contribuye a la recarga del agua subterránea, y III) el impacto positivo sobre la calidad del agua.

### Lecturas recomendadas

- Blue Plan, 2009. Virtual water: Which perspective for the Mediterranean water management and distribution? Blue Plan Notes, April 2008. 4 p.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije H.H.G. and Gautam R, 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics* 60(1): 186–203. [www.waterfootprint.org/?page=files/Publications](http://www.waterfootprint.org/?page=files/Publications)
- Gracia C., Burriel, J. A., Mata, T. and Vareyda J., 2000–2004, Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya Volums 1 to 9. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. (Obra completa)
- Hoekstra A.Y. and Chapagain A.K. 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern *Water Resource Management* 21:35–48.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. 2009 *Water Footprint Manual, State of the Art 2009*. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands. 128 p. [www.waterfootprint.org/?page=files/productgallery&product=apple](http://www.waterfootprint.org/?page=files/productgallery&product=apple)

## Lecciones extraídas del pasado: perspectiva histórica de la hidrología forestal y la conservación del suelo al norte y al sur de la cuenca mediterránea

**Pietro Piussi, Yves Birot, Éric Roose y Mohamed Sabir**

Los problemas de conservación del suelo y de la hidrología forestal están íntimamente unidos al proceso de deforestación. En el área mediterránea, la destrucción de la cubierta forestal empezó en tiempos prehistóricos debido, en parte, al resultado de la transformación de bosques en tierras agrícolas – aterrazando el terreno, organizando los flujos de agua y su drenaje e instalando cultivos de herbáceas y de árboles – o por el uso irracional de los bosques para pastoreo o diversos sistemas de cultivo rotativo. Desde el punto de vista hidrológico estas actividades dieron como resultado frecuentes inundaciones que causaron grandes daños a las comunidades que vivían en los valles y llanuras. Las consecuencias negativas de las actividades humanas se exacerbaban a causa de las condiciones medioambientales adversas específicas del área mediterránea: el clima, la topografía y la amplia distribución de la caliza. A nivel local, el descenso ocasional de la población ha conducido, en ciertos casos, al abandono del suelo y a una sucesión secundaria de cubierta forestal de nueva generación; sin embargo, la tendencia que ha prevalecido, por lo menos en algunas partes de la ribera norte del Mediterráneo, hasta mediados del S XIX o del XX es la explotación intensa del suelo. Esta es la situación con la que, actualmente, se encuentran los países de las riberas sur y este, a lo que, tal vez, haya que añadir los aspectos relacionados con la gestión de los recursos hídricos (colmatación de embalses).

---

Los programas de gestión de cuencas, que surgieron como respuesta a importantes catástrofes hidrológicas, se basaron en ingeniería civil y biológica y se han implementado en Europa desde la segunda mitad del siglo XIX; han tenido un gran éxito a pesar del limitado conocimiento en hidrología forestal y la insuficiente consideración de los factores sociales. Hoy, el reto consiste en mantener las funciones protectoras a través de la renovación de las áreas plantadas y su equipamiento en contextos socioeconómicos totalmente diferentes.

---

### Cuadro 23. Desde 1860 al presente: el Programa Francés de Restauración de Terrenos de Montaña (RTM)

Tras las inundaciones catastróficas de mediados de 1800, que afectaron a los tramos bajos de las cuencas de los ríos, debido a la retirada de bosques causada por la excesiva presión del hombre (demografía, sobrepastoreo y cultivo), surgió un activo debate político a nivel nacional. Tuvo como resultado una serie de actos y promulgación de leyes – la más conocida es la de 1882 sobre la “restauración y conservación de los terrenos de montaña”. El marco legal y judicial junto con una substancial financiación pública, permitió el desarrollo de una ambiciosa política estatal que tuvo como resultado la compra de 380.000 ha de suelo, sobre el que se llevaron a cabo trabajos de ingeniería civil y biología para prevenir y controlar la escorrentía y la erosión y limitar su impacto sobre personas e infraestructuras. Esta política tuvo lugar en un contexto general de expansión de la industria y de la promoción de programas nacionales, como el desarrollo ferroviario, la planificación del uso del suelo y su rehabilitación favoreciendo el drenaje y la aforestación (Landes, Sologne y Champagne) en un momento en el que florecía la ideología del progreso basado en la tecnología.

Además de una ideología real que surgía alrededor de los conceptos y objetivos del RTM, la Administración Forestal, encargada de llevar a cabo esta política, pudo organizar un cuerpo de métodos y tecnologías basados en los trabajos pioneros teóricos y aplicados de Surrel y Demontzey. Las operaciones, concentradas en las cabeceras de las cuencas hidrológicas y/o en las áreas vulnerables, se basaron en una combinación de: I) revegetación o potenciación de la vegetación existente plantando árboles (especies locales y *Pinus nigra*) en las pendientes, matorrales y herbáceas a lo largo de los márgenes en los barrancos, completado con algún aterrazamiento y II) ingeniería civil, que consistió en construir presas en escalera en los lechos de los torrentes para reducir la erosión de los márgenes y limitar el transporte de materiales. Echando la vista atrás hacia las condiciones que prevalecían hace 150 años, no cabe duda de que esta política, mantenida década tras década, ha tenido bastante éxito. Esta historia de un éxito, o saga RTM, se presentó como la panacea y se usó como base para un esquema de “copiar/pegar” de los conceptos y principios del RTM en otros países, en Europa y en el Magreb, durante el período colonial. En el último caso, la infravaloración de las diferencias en los contextos ecológicos, socioeconómicos y culturales condujeron, en ocasiones, al fracaso (ver Cuadro 25)

#### Algunas cifras sobre los logros del RTM

Reforestación > 260.000 ha

Municipios involucrados: 950 en 25 Departamentos en zonas de media o alta montaña; 1.100 torrentes “tratados”; 100.000 pequeñas presas construidas; trabajo en 115 deslizamientos de tierras y 100 corredores de avalanchas.

Sin embargo, visto desde un ángulo social, se debe hacer notar que el RTM ha seguido, básicamente, un proceso vertical (de arriba a abajo) que, en algunos casos, ha dado origen a conflictos con las poblaciones locales rurales (se forzó a los granjeros a vender sus tierras) o aceleró su migración a las ciudades u otras áreas. No hay que perder de vista el contexto histórico del siglo XIX, caracterizado por una marcada centralización y por la convicción de que tales políticas dirigidas al interés público, y al equilibrio de las necesidades de las áreas de cabecera y el tramo bajo (e incluso áreas más amplias) y cuyos objetivos eran a tan largo plazo, debía ser diseñada y ejecutada de un modo centralizado.

La edad de oro de la RTM tuvo lugar entre 1882 y la primera guerra mundial. En 1909, más de dos tercios de las áreas designadas por la RTM ya se estaban tratando. El período entre 1914 y 1940 se caracterizó por el mantenimiento y gestión del trabajo ya echo debido al impacto económico y social de la guerra. El declive vino después de la segunda guerra mundial como resultado de una disminución de los fondos y el aumento del coste del mantenimiento (en particular los costes de mano de obra). En 1980 el RTM sufrió una profunda reforma y se restableció dentro de la Oficina Nacional de Bosques (ONF).

Los principales retos, en un contexto de recursos financieros limitados como el actual, consisten en encontrar compromisos entre el mantenimiento o la renovación de los bosques y su equipamiento, y cómo tratar las necesidades de seguridad (riesgos aceptables y aceptados) en relación con diversos riesgos naturales en las áreas montañosas. Es más, hoy en día resulta primordial la articulación de una política estatal con las autoridades locales. La política RTM del siglo XIX fue una respuesta a hechos catastróficos, a través de una nueva legislación y con considerables medios económicos. ¿Será suficiente con actualizar la RTM, tendrá la suficiente fuerza y eficacia, o tendremos que esperar a la próxima catástrofe ecológica o humana?

### Cuadro 24. Cuenca fluvial, escorrentía, presa, sedimentos: la historia italiana

Durante los últimos 150 años los trabajos de aforestación y de ingeniería hidráulica se han desarrollado en paralelo en las montañas italianas. Montañas y colinas dominan el paisaje italiano, mientras que las planicies ocupan sólo el 20% del país. A finales del siglo XIX, tras muchos siglos de sobreexplotación de las áreas montañosas –que dieron como resultado altas densidades de población y prácticas irracionales de uso del suelo – el territorio italiano se caracterizaba por una cubierta forestal drásticamente reducida y una erosión torrencial extremadamente activa, mientras que las planicies entre las montañas y el mar eran ocupadas con frecuencia por marismas.

Ya a finales del siglo XIX se llevaron a cabo algunos trabajos de aforestación y control de los torrentes. Sin embargo, una nueva política integrada de uso del suelo, lanzada en 1933, dirigía la mejora integral de las cuencas hidrológicas mediante del drenaje, construcción de carreteras y nuevos asentamientos en las planicies junto con trabajos de ingeniería y silvicultura en las montañas. En el mismo período, el desarrollo hidroeléctrico requería medidas de control de la erosión para limitar la acumulación de sedimentos en los embalses artificiales. Entre 1867 y 1950 las áreas plantadas sumaban un total de 194.000 ha. El trabajo de recuperación de marismas prosiguió durante mucho más tiempo.

En la década de 1950, se inició una nueva ola de aforestación para mitigar los altos niveles de desempleo de las áreas rurales. Entre 1950 y 1959 se establecieron 159.000 ha de plantaciones, principalmente en la parte sur del país. La técnica más comúnmente empleada en terreno inclinado era el uso de *gradoni* – pequeñas terrazas construidas en líneas topográficas en las que las plantas jóvenes podían tener suficiente suelo y humedad para sobrevivir durante la estación seca. En los Apeninos y en la parte baja de los Alpes, las degradadas condiciones del lugar requerían del uso prácticamente en exclusiva de *Pinus nigra*, incluso si ocasionalmente se sembraba alguna frondosa entre los pinos jóvenes, con bastante poco éxito. Las plantaciones llevadas a cabo desde la década de 1960 se llevaron a cabo en mejores suelos, por lo que se usaba el abeto (*Albies alba*) y el abeto douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Un tema diferente era la aforestación– realizada principalmente con pino piñonero (*Pinus pinea*) – sobre los suelos arenosos a lo largo de la costa, dirigidos a frenar la erosión del viento y los movimientos dunares, así como a proteger los cultivos agrícolas, asentamientos e infraestructuras.

Desde un punto de vista social, es cierto que los programas de aforestación en las áreas montañosas crearon muchas oportunidades laborales. Hubo, sin embargo, al menos al principio y especialmente al sur de Italia, una marcada oposición a las plantaciones por parte de los pastores y latifundistas que alquilaban sus tierras a pequeños arrendatarios. Como consecuencia, las jóvenes plantaciones eran a menudo destruidas por el fuego y por pastero ilegal.

La gestión de las cuencas hidrográficas por medio de la ingeniería civil y la aforestación, normalmente llevada a cabo en suelo privado, siempre se acababa dificultada por falta de recursos financieros públicos. Esta falta de fondos no permitió el control del sotobosque ni el aclareo en las plantaciones, ni tampoco los trabajos de mantenimiento en las presas en años más recientes. Durante las últimas décadas, el valor de la madera ha caído en picado mientras que los nuevos bosques se valoran ahora por su valor estético y de ocio; por estas razones, ha crecido la importancia social del mantenimiento de los bosques pero sin ventajas para sus propietarios. Hoy, la mayoría de las plantaciones son excesivamente densas y los períodos secos del verano causan gran mortalidad, lo que aumenta la acumulación de combustible, que supone un elevado riesgo de incendio. La regeneración natural de las especies introducidas suele ser nula, y el establecimiento de otras especies (renaturalización) no es común. Los silvicultores se enfrentan ahora a nuevos problemas económicos, técnicos, sociales y políticos.

Los trabajos de gestión de cuencas se llevaron a cabo por el estado central a mediados del siglo XIX (unas décadas antes en Austria) como respuesta a la necesidad de controlar las inundaciones y reducir la erosión del suelo, lo que causaba frecuentes pérdidas de vidas y daños importantes en los asentamientos e infraestructuras de las partes bajas de los valles y en las planicies (Cuadros 23 y 24). El trabajo llevado a cabo durante el siglo XX también se orientó a la protección de las laderas de las montañas que rodean las reservas artificiales de agua construidas para la industria eléctrica. En la mayoría de

### Cuadro 25. Programas de conservación del suelo en el Magreb con particular atención al programa de Defensa y Restauración de Suelos en Argelia desde 1940 hasta 1980

Tras de la colmatación del puerto de Orán y de varios fenómenos espectaculares relacionados con la erosión en la cordillera del norte de Argelia, la administración forestal francesa consultó con un especialista americano en conservación del suelo, W.C. Lowdermilk, e inició entonces un ambicioso programa de conservación de suelo y agua denominado DRS: este programa se basaba en aterrazamientos llevados a cabo siguiendo las curvas de nivel en las zonas cultivadas, (denominados “terrazas” de absorción), complementado por trabajos del tipo RTM (ver Cuadro 23) de control torrencial en barrancos, y aforestación de suelos degradados y sobrepastoreados principalmente en las cabeceras de las cuencas. Estos trabajos se basaron en el conocimiento empírico, sin prácticamente investigación que los validase. Entre 1940 y 1980, aproximadamente, en la región del Magreb el servicio especializado del DRS, bajo los auspicios de varios ministerios, trató un millón de hectáreas. La administración colonial, y el estado, aportaron fondos y medios considerables con objeto de contrarrestar el espectacular fenómeno de la erosión mediante extensas áreas de aterrazamientos en las cuencas, incluidas las presas, reforestando las partes altas de las cuencas (más de 800.000 ha sólo en Argelia), corrigiendo los barrancos y estableciendo cursos temporales de agua (oueds), al objeto de proteger las grandes construcciones, como las presas, que se veían amenazadas.

A partir de los años 80 se han llevado a cabo evaluaciones de estos programas de conservación de agua y suelo en Argelia así como en Túnez y Marruecos. Muestran, en general, un impacto positivo limitado de las ingentes inversiones. Aún hoy prevalecen inundaciones, colmatación de las presas y baja producción de madera y de los cultivos. En Argelia una investigación ha mostrado que en las 350.000 hectáreas tratadas, el 20% de las terrazas se han destruido intencionadamente para implantar cultivos, el 60% padecen abarrancamiento –nunca han tenido mantenimiento y ya no son operativas– mientras que sólo el 20% están en buen estado pero se localizan en áreas no proclives a la erosión. En Marruecos, los estudios muestran que la mayoría de las terrazas construidas en suelos con cierto tipo de material (argilitas, esquistos blandos, margas) o en pendientes pronunciados (25%) han contribuido a los deslizamientos de tierra y abarrancamientos, que son peores que la erosión superficial que trataban de corregir.

Desde 1985 se aplica en Argelia un nuevo método basado en un enfoque participativo de desarrollo rural integrado que se propone, se discute y se experimenta. Este enfoque incorpora nuevos resultados de investigaciones (control de la erosión superficial, efectos de la preparación del suelo de algunas prácticas agrícolas) y nuevos criterios para una mejor explotación del territorio a la hora de producir cultivos para los habitantes locales y forraje para los animales domésticos, al tiempo que se reduce el riesgo de erosión. Estudios recientes llevados a cabo en Marruecos, sobre las técnicas tradicionales de gestión del agua superficial y la fertilidad del suelo, muestran el uso de un amplio abanico de técnicas en relación con las condiciones sociales y agroecológicas locales. Se proponen mejoras para incrementar su efectividad-coste y su eficacia para controlar la pérdida de suelos, secuestro de carbono y biodiversidad.

los casos este trabajo – la construcción de presas y la reforestación– era también un preciado apoyo para el empleo en las regiones montañosas en las que el despoblamiento ya era un fenómeno ampliamente extendido. Las plantaciones se llevaban a cabo con especies de árboles pioneras. Las técnicas de ingeniería civil aplicadas en los torrentes de montaña así como las técnicas de reforestación se discutían ampliamente y se convertían en cursos universitarios; además, las experiencias locales estimulaban contactos y visitas internacionales.

Sin embargo, algunos de los factores (agricultura y pastoreo) que provocaron la deforestación y erosión del suelo, también actuaron, por lo menos localmente, como barreras para la formación de una nueva cubierta forestal, puesto que las plantaciones redujeron las áreas de pastoreo y limitaron los usos tradicionales del suelo, profundamente

arraigados en las áreas rurales remotas. La reforestación, no siempre estrictamente ligada al trabajo de gestión de las cuencas, no era sólo un problema técnico que tenía que ver con la ecología y la ingeniería civil. La gestión de las cuencas pretendía mejorar las condiciones de vida de sectores importantes de la población y la economía, agricultura moderna en las llanuras, ciudades, industrias, carreteras y ferrocarriles, etc. En algunos casos suponían también una oportunidad para dejar huella de la actividad del poder político: el “nuevo” paisaje era una firma permanente del poder gobernante. Sin duda, también era un alivio para el desempleo –al menos temporalmente. Se ha dicho muy poco sobre las sociedades tradicionales locales que viven en los territorios de montaña; la tierra erosionada y una vegetación pobre mantenían una economía rural. La aforestación, especialmente cuando se reforestaban suelos comunales (como los baldíos en Portugal) o grandes propiedades privadas alquiladas a pequeños campesinos fue agudizando las dificultades económicas preexistentes y estimulando el malestar social. El pastoreo ilegal y los incendios fueron las respuestas obvias.

Los ambiciosos programas de conservación de suelo y agua llevados a cabo en la ribera sur del Mediterráneo, con un enfoque más integrado orientado al pastoreo, la agricultura y la silvicultura conjuntamente, han producido resultados muy diferentes que, de alguna manera, quedan muy por debajo de las expectativas. Esto se debe al insuficiente conocimiento científico y a un planteamiento demasiado vertical (de arriba a abajo).



Figura 57. Operaciones de reforestación en Italia en 1895.



**Figura 58.** Equipos de control de torrentes en Marruecos. Fotos de Mohamed Sabir.

La hidrología forestal y las medidas de conservación del suelo se desarrollaron mucho más tarde en la ribera sur (Marruecos, Argelia y Túnez) del Mediterráneo. Estas medidas se han llevado a cabo a muy gran escala por parte de la administración colonial francesa desde 1940 a través de ambiciosos programas de gestión de cuencas restaurando el suelo degradado por medio de la aforestación, de la construcción de terrazas y de la gestión agroforestal. El modelo RTM (ver Cuadro 23) inspiró toda la empresa pero en un contexto diferente, en particular porque se llevó a cabo en áreas densamente pobladas y con un planteamiento más integrador de las actividades y el desarrollo rurales a nivel del paisaje. Hasta cierto punto, también combinaba la ingeniería biológica y la ingeniería civil – para esta última, los desarrollos tecnológicos hicieron posible el uso de maquinaria pesada (tractores, bulldozers, etc /

Este trabajo, llevado a cabo a lo largo de más de un millón de hectáreas en Argelia, Túnez y Marruecos, pretendía crear una cubierta forestal, reforzando los taludes y protegiendo los grandes asentamientos, desarrollando prácticas de pastoreo y agricultura sostenibles así como protegiendo las infraestructuras humanas. Estos programas se aplicaron una vez que los países hubieron recuperado su independencia, pero con diferentes niveles de inversión (Figura 57). El Cuadro 25 ofrece una visión global de estos programas y sus resultados, que se aplicaron con un conocimiento limitado de los procesos de erosión, y una política marcadamente diseñada y aplicada de arriba a abajo y de manera centralizada (el enfoque participativo no estaba “de moda” en esos tiempos). (sic).

Las principal razón del fallo general de estos programas hay que buscarlas en problemas técnicos y sociales que se pueden resumir de la siguiente manera: I) conocimiento pobre de la geología y la dinámica del suelo locales, II) sobreestimación de la erosión laminar, III) en general, la sobreestimación de la escorrentía media, incluso si puede ser importante en caso de lluvias fuertes e intensas; IV) material de plantación de árboles de escasa calidad y tendencia a la plantación monoespecífica a gran escala, V) la reticencia de la población local a cambiar prácticas como técnicas de cultivo y de pastoreo y V) los aspectos legales relativos a la propiedad del suelo, etc.

---

Se debería reconsiderar la puesta al día y el ajuste de las políticas de conservación de agua y suelo en relación a bosques y árboles en el contexto actual. Esta renovación se debería emprender lo antes posible sin esperar a que ocurran nuevas catástrofes, usando los conocimientos más modernos e integrando todos los aspectos relacionados con el desarrollo sostenible.

---

Las lecciones a aprender de estas empresas del pasado para controlar los problemas hídricos y de pérdida de suelo son múltiples:

- a) Resulta evidente que los problemas medioambientales y sus soluciones no son sólo técnicos sino también socioeconómicos y culturales. Para que un programa resulte efectivo y duradero se debería desarrollar sin que la población local se involucre en exceso. (sic). Las administraciones locales deberían responsabilizarse más tanto del nuevo desarrollo urbano como de las actividades rurales tradicionales.
- b) Los problemas medioambientales son complejos y tienen que ver, entre otros, con el balance hidrológico, la pérdida de fertilidad del suelo por la erosión, y el desarrollo rural y económico. La solución debe, por lo tanto, integrar todos los aspectos del desarrollo sostenible.
- c) Resulta crucial definir los riesgos aceptables y el balance de ventajas y desventajas entre riesgos diferentes y/o interrelacionados.

Mirando el contexto actual resulta obvio que es necesario un planteamiento holístico de la gestión y la planificación de los paisajes y los territorios. Los recientes hechos del sur de Italia han demostrado que los problemas de conservación no solo implican la gestión tradicional de cuencas y la aforestación, sino también el uso inapropiado del suelo para construir edificios e infraestructuras sobre un suelo geológicamente frágil. La erosión laminar ha disminuido en las últimas décadas debido al aumento de la superficie forestal (principalmente debido a la sucesión secundaria) y a la protección del suelo; sin embargo, los incendios forestales pueden causar un daño importante, en cualquier momento, a las capas superficiales del suelo. Los corrimientos de tierras y la erosión en cárcavas son los mecanismos que más contribuyen al transporte de materiales. El clima y sus caprichos – como la sequía del verano de 2003 y las intensas precipitaciones del invierno de 2010– nos recuerdan que los fenómenos naturales no se pueden infravalorar. Desde el inicio de las políticas de gestión de las cuencas han tenido lugar muchos cambios y han surgido nuevos problemas: la regeneración de las plantaciones más antiguas, la falta de aclareo, y el aumento del riesgo de incendio, el impacto de la fauna silvestre (ungulados), el nuevo papel de los bosques para el ocio, la fijación de CO<sub>2</sub> y la biodiversidad. Estos temas se deben abordar conjuntamente.

### Lecturas recomendadas

- Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze 1961. Atti del congresso nazionale sui rimboschimenti e sulla ricostituzione dei boschi degradati. AISF Firenze.
- Arabi, M. , Kedaïd, O.E., Bourougaa, L., Asla, T. and Roose, E., 2004. Bilan de l'enquête sur la défense et la restauration des sols (DRS) en Algérie. Sécheresse (Paris) 15(1): 87-95.
- Brugnot G. and Cassayre Y. 2003. De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels XII World Forestry Congress. Québec, Canada. [www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0034-C3.HTM](http://www.fao.org/DOCREP/ARTICLE/WFC/XII/0034-C3.HTM)
- Lilin, Ch. 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. Cah. ORSTOM sér Pédol., 22: 139-146.
- Puglisi, S. 1996. Le scienze forestali contro le alluvioni. In: La difesa dalle alluvioni (M. Falcia e F. Preti eds.) Consiglio Nazionale delle Ricerche. Pp. 485-499.
- Roose, E. 2004. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive: vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Sécheresse (Paris)15:1: 9-18.
- Roose, E., Laouina, A. and Sabir, M., 2010. Adaptation des stratégies paysannes de la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols(GCES) aux conditions écologiques du Maroc. IRD + ENFI, éditeurs, Montpellier. 380 p.

## Retos clave

La sostenibilidad actual y futura de los socio-eco-hidrosistemas mediterráneos depende de nuestra capacidad colectiva para enfrentarnos a algunos retos significativos. Sin la pretensión de ser exhaustivo, este capítulo identifica algunos de los principales retos, explica su base científica y propone modos de afrontarlos. Se han seleccionado los cinco retos que se enumeran a continuación:

1. Implicaciones del cambio climático sobre los bosques y la hidrología
2. Uso del suelo y crecimiento demográfico
3. Aforestación para combatir la desertificación
4. Ecosistemas de ribera y acuáticos
5. Economía del agua y de los bosques



**Figura 59.** Sequía que afectó a la vegetación en la Península Ibérica en la primavera de 2005. Entre noviembre de 2004 y marzo de 2005 España y Portugal experimentaron su invierno más seco desde 1943 y 1980 respectivamente. El impacto de la sequía sobre la vegetación se muestra en esta imagen de anomalías de la vegetación, creada usando datos recogidos por el Moderate Resolution Imaging Spectoradiometer (MODIS) entre el 7 de abril y el 22 de abril de 2005. Comparados con la densidad media de vegetación (un buen indicador de la salud de las plantas) durante el mismo período, en los cinco años precedentes, la vegetación estaba claramente estresada. El color marrón representa las regiones en las que la vegetación había crecido menos y era menos densa que la media, los minúsculos puntitos verdes muestran las áreas en las que la salud de la vegetación es superior a la media. El rojo-marrón oscuro muestra las regiones más gravemente afectadas. Nótese la importancia de la red de presas, cuya recarga también se vio afectada por la sequía invernal. En un contexto de cambio climático sequías como esta, podrían resultar más frecuentes. Fuente: NASA.



## Implicaciones del cambio climático sobre los bosques y la hidrología: una visión general

Javier Martin-Vide, Francesc Gallart y Joan-Albert Lopez-Bustins

---

La cuenca mediterránea es una región climatológicamente compleja con una amplio abanico de subtipos climáticos y, como consecuencia, de entornos ecológicos de grandes contrastes.

---

La cuenca mediterránea es una región geográfica única en el mundo. Comprende (I) un gran mar que mide 2,5 millones de km<sup>2</sup>, con un volumen de 3,7 millones de km<sup>3</sup>, y está situado entre tres continentes casi sin conexión con aguas oceánicas, y (II) el territorio que la rodea presenta cordilleras de cierta importancia. Se extiende a lo largo de 3.800 km desde las costas orientales del Atlántico a través del estrecho de Gibraltar –un “mar entre tierras” como su nombre indica. En su punto más estrecho, el estrecho de Gibraltar mide sólo 15 km de ancho lo que refuerza la paradoja –para un mar– de su naturaleza “continental”.

La variedad y complejidad de sus factores geográficos y su “aislamiento del exterior” le proporcionan un clima con una personalidad específica y unas características únicas, y aún así, aunque su clima es mediterráneo por definición, muchos de los territorios que lo rodean presentan tantos matices que el término “climas” o “mosaico climático” resultan más adecuados.

El Mediterráneo ha prestado su nombre a uno de los principales tipos de clima del planeta: el clima mediterráneo que, en el subconsciente colectivo, está asociado a condiciones atmosféricas benignas, con la idea de playas bañadas por el sol, inviernos suaves, sol constante, veranos largos, poca lluvia y paisajes que, se podría decir, han sido secularmente humanizados durante milenios, con escasa cubierta vegetal. El adjetivo “mediterráneo” se ha exportado, desde el punto de vista climático, a regiones de otros continentes de latitudes similares, ubicadas occidentalmente y con el océano al oeste.

En términos generales, los climas mediterráneos, o climas subtropicales de veranos secos (entre 30/32° y 41/45° de latitud y en la línea de costa del borde occidental de los continentes) están influenciados por el frente polar en invierno presentando temperaturas moderadas y clima lluvioso, y por los anticiclones subtropicales en verano cuando el tiempo es caluroso y seco (subtipo *Csa Köppen*) excepto en algunas áreas costeras donde se pueden dar condiciones más suaves, e incluso nieblas debido a la presencia de corrientes oceánicas frías (subtipo *Csa Köppen*)/Tabla 12).

**Tabla 12.** Principales características de los climas mediterráneos

- Todas las regiones se localizan entre 30/32° y 41/45° Norte /Sur y, excepto las grandes áreas de la cuenca mediterránea, se localizan en las costas occidentales.
- El régimen típico de precipitación estacional presenta inviernos húmedos y veranos secos.
- Los veranos son entre cálidos y calurosos, y los inviernos entre frescos y templados; las temperaturas por debajo de 0°C no son frecuentes a nivel del mar.
- La precipitación anual es relativamente baja. Un elevado porcentaje cae durante la mitad invernal del año. La precipitación media normal varía entre 250 y 900 mm.
- La radiación solar es elevada, especialmente en las áreas interiores debido a los cielos claros y sin nubes y a la baja humedad. La evapotranspiración es alta en las áreas interiores. Las corrientes marinas frías dan lugar a veranos suaves y nebulosos en algunas zonas costeras.
- Las montañas, a menudo paralelas a la línea de la costa, influyen y modifican los patrones climáticos, formando las características sombras pluviométricas, “islas” lluviosas y microclimas.

Los complejos factores geográficos de la cuenca mediterránea producen un “puzzle” de regímenes de lluvia estacionales. En las regiones orientadas hacia el este (por ejemplo la franja este de la Península Ibérica) la estación más lluviosa es el otoño y no el invierno. En otras áreas, la estación más lluviosa es la primavera e incluso el verano en algunas áreas montañosas del norte.

Con respecto a la dinámica atmosférica, la cuenca mediterránea es un lugar único en el que la señal de *teleconexiones\** y de los patrones de variabilidad externos suele ser bastante débil. Ciertos mecanismos internos tienen más influencia en sobre las precipitaciones que los principales patrones hemisféricos. Así, la *Oscilación Mediterránea\**, que conecta las cuencas orientales y occidentales por medio de las saludables longitudes de onda de la circulación superior (*Ondas Rossby\**), dan lugar a un comportamiento opuesto pero sincronizado entre ambos extremos, así que cuando llueve en la Península Ibérica, tiende a ser seco en la Península de los Balcanes y viceversa. Algo parecido ocurre con la temperatura.

---

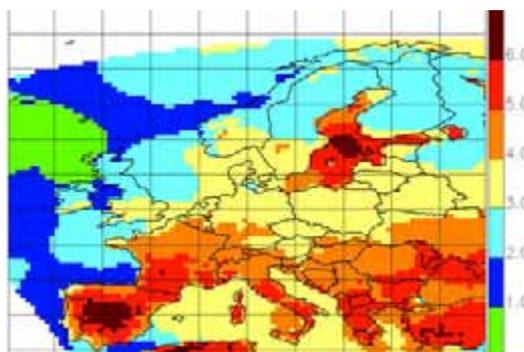
La cuenca mediterránea lleva sufriendo, desde los años 70, un proceso de calentamiento parecido al que ha experimentado el planeta, aunque presenta un ritmo de calentamiento más alto que el global. Los modelos climáticos coinciden en un aumento evidente y generalizado de la temperatura a lo largo del siglo XXI.

---

Las mejores series de temperaturas a nivel del suelo, disponibles para la cuenca mediterránea muestran, casi sin excepciones, un aumento de temperatura desde los años 70 paralelo al que ha tenido lugar en el planeta. Se pueden apreciar las mismas fases en la evolución de la temperatura, es decir, valores por debajo de los del período interanual de referencia (1961–1990) durante la segunda mitad del siglo XIX; un aumento durante las décadas iniciales del siglo XX; un descenso hacia los años 60 del pasado siglo; y un evidente aumento final desde los años 70 hasta el presente.

Se debería subrayar sin embargo que, en muchos casos, el aumento de la temperatura en la cuenca mediterránea, durante el último siglo (1906–2005), sobrepasa el valor de 0,74°C correspondiente al aumento de temperatura global, según el Cuarto In-

**Figura 6o.** Aumento de la temperatura anual para 2071–2100 en Europa relativo a las últimas dos décadas del S. XX. Fuente: <http://prudence.dmi.dk/>.



forme del IPCC (2007). Es decir, la tasa de calentamiento en la cuenca mediterránea durante el pasado siglo, ha sido algo más alto que la tasa global y se puede estimar en, aproximadamente, 1°C.

Según el Cuarto Informe IPCC (IPCC, 2007), un aumento de temperatura en la cuenca mediterránea es, como en el contexto global, altamente probable (90%) durante el siglo XXI. Si podemos esperar un aumento de la temperatura de entre 1,8°C y 4,0°C, a escala global durante el período 2090–2099, respecto a las dos últimas décadas del siglo XX, dependiendo del escenario de emisiones que se contemple, se puede esperar un incremento mucho mayor en las áreas que rodean el Mediterráneo. Sin embargo, puesto que constituye un área marina, una parte sustancial de las temperaturas de la cuenca son moderadas por el efecto de las aguas— es decir, la influencia termorreguladora del mar. Por lo tanto se puede esperar un aumento más moderado en las áreas marítimas y en las zonas costeras bajo su influencia, que en los entornos continentales montañosos del interior. En particular, los modelos climáticos indican que en el interior de las penínsulas de Italia, los Balcanes, Anatolia e Ibérica, especialmente esta última, la temperatura subirá entre 1 y 2°C más que en las zonas costeras cercanas (Figura 6o).

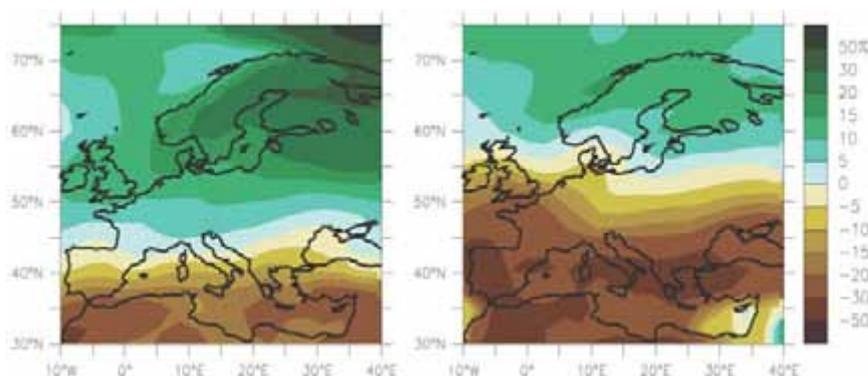
Las proyecciones locales del nivel del mar apuntan a un ascenso notable causado por la expansión térmica de las masas de agua y la fusión de los glaciares. Para la cuenca mediterránea, los modelos regionales predicen aumentos del nivel del mar de aproximadamente 35 cm hacia final de siglo, aunque pueden ser más moderados a lo largo de la costa. Este aumento del nivel del mar podría favorecer la entrada de agua salada en los acuíferos próximos al mar y amenazar ecotonos costeros como deltas y marismas.

---

Existe incertidumbre sobre la evolución futura del patrón de la lluvia en la cuenca mediterránea, pero es muy probable que disminuyan las precipitaciones totales y que muestren una variabilidad temporal mayor que en el presente.

---

El aumento de la temperatura en el planeta probablemente refuerce el ciclo hidrológico debido a los aumentos locales de evapotranspiración, con el resultado del retorno del vapor de agua del aire a la superficie de la Tierra, en forma de más lluvia. Los modelos globales predicen que este fenómeno no se generalizará puesto que identifican zonas subtropicales, como la mediterránea, y muchas zonas tropicales, que recibirán menos lluvia en el futuro. Esto es lo que resulta más probable, aunque se debe mencionar que, en este



**Figura 61.** Cambio de precipitación en Europa según las simulaciones del escenario A1B entre 1980–99 y 2080–99, promediadas para 21 modelos. Izquierda: diciembre, enero y febrero; derecha: junio, julio y agosto. Fuente: Christensen et al. 2007.

sentido, la incertidumbre es mayor que en las predicciones del aumento de temperatura.

Si se combinan ambos fenómenos –calentamiento y reducción de precipitaciones– se puede esperar un futuro escenario en el sur de Europa con menores recursos hídricos, lo que exacerbará las diferencias con el resto del continente.

---

Para la mitad fría del año, las predicciones de la precipitación de los modelos climáticos, muestran un cinturón al norte del Mediterráneo con incrementos, y un cinturón al sur con descensos. En verano, sin embargo, los modelos predicen un descenso generalizado de las precipitaciones.

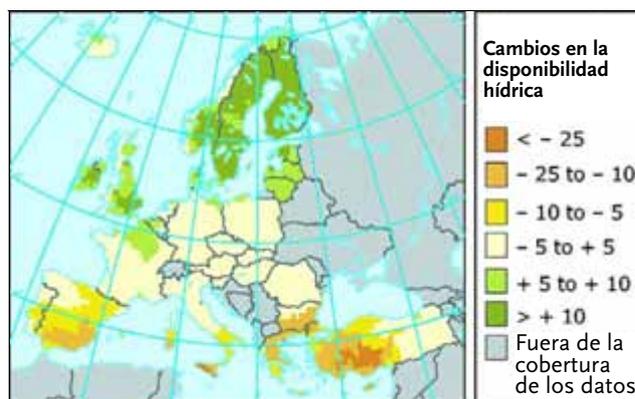
---

Los modelos climáticos presentados en el Cuarto Informe del IPCC proyectan para Europa, un aumento de las precipitaciones invernales en el extremo norte de la cuenca mediterránea, un descenso en el resto de las áreas, y una reducción general de la lluvia en verano en toda la cuenca mediterránea (Figura 61). Así, la cuenca experimentará un notable y generalizado descenso de precipitación estival, de entre un 20% y un 50% (junio, julio y agosto), mientras que en invierno (diciembre, enero y febrero) se espera un acusado gradiente entre un cinturón al norte con una precipitación en aumento y uno en el sur con menos precipitación.

Los modelos climáticos regionales, con mayor resolución espacial, confirman esta proyección para Europa. En particular, los resultados más sustanciales del proyecto PRUDENCE, que supuso uno de los mayores esfuerzos de investigación y cálculo en ciencia climática, se puede resumir muy sucinta y textualmente de la siguiente manera: “Clima futuro en Europa: veranos más cálidos y secos al sur, inviernos más suaves y húmedos al norte.” ([prudence.dmi.dk/public/raisanen\\_et\\_al.html](http://prudence.dmi.dk/public/raisanen_et_al.html)).

Como consecuencia, la cuenca mediterránea, una parte de la cual comprende toda la zona sur de Europa, será muy probablemente (90%) más cálida que en las décadas pasadas y posiblemente (66%) menos lluviosa. Esto da soporte a la hipótesis, ya verificada en algunas áreas, del reemplazo progresivo del bosque por formaciones arbustivas, que tienen menor demanda hídrica y están mejor adaptadas a las características estivales de déficit hídrico del clima mediterráneo.

**Figura 62.** Figura 62. Cambios en la disponibilidad hídrica media del suelo hasta 2030. Fuente: EEA 2005.



El aumento de temperatura incrementará la demanda evapotranspirativa e, incluso sin descenso de las precipitaciones, habrá menos humedad en el suelo, más estrés hídrico en la vegetación y un descenso de los recursos hídricos generados en las áreas lluviosas.

El cambio que se espera en las condiciones climáticas empezará por causar un descenso generalizado de la humedad del suelo, mientras que los descensos en la recarga de los acuíferos y la producción de escorrentía serán más marcados en las áreas húmedas (donde la evapotranspiración está limitada por la energía disponible) que en las áreas más secas (donde la evapotranspiración está limitada por el agua).

La mayor parte del área situada alrededor de la cuenca mediterránea experimentará descensos de la media anual de disponibilidad de agua en el suelo de más del 10% en 2030 (Figura 62). En particular el sur y sudeste de la Península Ibérica, Sicilia y las penínsulas de Anatolia y los Balcanes, en la orilla norte de la cuenca, sufrirán los mayores descensos.

En verano, el probable aumento de temperaturas y el posible descenso de las precipitaciones tendrá como posible resultado un aumento del estrés hídrico de la vegetación, con un descenso absoluto de las, ya de por sí bajas, escorrentía y recarga de los acuíferos. Durante la parte más fría del año, incluso en el caso de “sin cambios de precipitación”, la recarga de los acuíferos y la escorrentía disminuirán significativamente en las áreas húmedas y de montaña-las fuentes de recursos hídricos– debido al aumento de la demanda de la evapotranspiración. Los cambios serán menores en las áreas más secas en las que la evapotranspiración no está limitada por la energía sino por la disponibilidad de agua. Es más, el aumento de la temperatura disminuirá el efecto regulador del manto de nieve en las montañas.

En el sur del Mediterráneo, el efecto combinado del aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación tendrán graves efectos sobre la humedad del suelo y la generación de recursos hídricos.

La cuenca mediterránea experimentará, muy probablemente, una mayor frecuencia e intensidad de sequías y olas de calor que provocarán un aumento de los incendios forestales. Las lluvias torrenciales también podrán aumentar aunque esta proyección está sujeta a un elevado nivel de incertidumbre.

A pesar de que las proyecciones de la evolución futura de los riesgos relacionados con el clima son inciertas, se puede esperar que el aumento de la temperatura cause olas de calor y sequías más frecuentes e intensas en la cuenca mediterránea. Esta proyección refuerza la hipótesis de incendios forestales más frecuentes.

La dinámica atmosférica subtropical más típica del futuro, (casi tropical al sur de la cuenca) podría involucrar procesos convectivos que podrían ser más vigorosos como resultado del calentamiento superficial. Puede suponer un posible aumento de las lluvias de alta intensidad. Si se refuerza, el binomio “sequía-lluvia torrencial” será necesaria una gestión muy cuidadosa de los bosques mediterráneos para evitar los procesos de erosión y desertificación, junto con desequilibrios biológicos irreversibles.

---

**El área forestal puede experimentar cambios importantes debido al cambio global que, también puede condicionar la futura disponibilidad de recursos hídricos.**

---

En las últimas décadas, diferentes mapas de uso del suelo del área mediterránea, particularmente en el norte, han mostrado un aumento de la superficie forestal en detrimento de las de cultivo. Estos cambios ocurren principalmente en zonas de montaña media en las que el abandono de los pastos y cultivos ha permitido un aumento de la cubierta forestal. Las tendencias decrecientes observadas en el registro de los caudales de diversos cursos en el norte de España, se han atribuido a un mayor consumo hídrico por parte de los bosques, aunque parcialmente enmascarados por la variabilidad climática y los cambios en las áreas de regadío. Esta reciente tendencia de los bosques aumentará el riesgo de incendios forestales en el futuro inmediato debido a las cantidades cada vez mayores de combustible y al aumento de la continuidad de la masa forestal.

La expansión actual del bosque podría invertirse debido a las nuevas condiciones ambientales del siglo XXI. Los modelos ecológicos predicen una mortalidad generalizada de los bosques que actualmente están en el límite de su equilibrio hídrico para mediados de siglo, mientras el aumento de las temperaturas favorecerá la dispersión de los bosques en las áreas de media y alta montaña.

### Lecturas recomendadas

- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr A. and Whetton, P. 2007. Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.
- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M. and Miller, H.L. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- EEA 2005: European Environment Outlook. European Environment Agency, Copenhagen. [www.eea.europa.eu/publications/eea\\_report\\_2005\\_4/](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2005_4/)

## Afrontar el aumento de población y el cambio de uso del suelo

Gaëlle Thivet

La región mediterránea se caracteriza por un elevado crecimiento demográfico, rápidos cambios en el uso del suelo y extensas degradaciones visibles del entorno. En algunos casos, estas degradaciones se observan en ambas riberas mientras que otras son más específicas de una ribera o subregión debido a las condiciones socioeconómicas, demográficas y medioambientales.

---

El elevado crecimiento demográfico del sur y el este aumentará enormemente las necesidades de alimento, agua, suelo y energía e incrementará la presión sobre los recursos naturales. Los riesgos naturales y sociales serán más elevados en las costas mediterráneas cuya calidad e integridad están amenazadas.

---

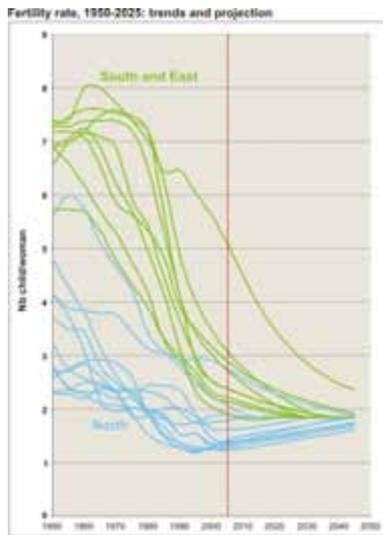
En los países de la cuenca mediterránea, las cifras de población residente aumentaron de 207 a 473 millones entre 1950 y 2010. Al sur y al este, la población casi se ha doblado hasta alcanzar los 280 millones de habitantes en 2010, a lo largo de un período de treinta años. El hecho principal observado, durante los últimos 20 años, ha consistido en la caída de las tasas de fertilidad en los países del sur y del este (SEMCs) (Figura 63) y existen grandes posibilidades de que esta transición demográfica continúe hasta el 2050. A pesar de la convergencia de los índices de fertilidad, se espera que el cambio demográfico continúe. La población de las riberas del sur y del este podrían continuar aumentando hasta los 57 millones en 2025 y 117 millones en 2050. Al norte, el crecimiento de la población alcanzaría los 3,8 millones de habitantes en el año 2025 y podría decrecer a unos 3 millones entre 2025 y 2050 (Figura 64).

Se espera que la presión demográfica sea mayor en las áreas urbanas y costeras. En el año 2025 el número de habitantes urbanos podría aumentar hasta los 20 millones y los flujos turísticos podrían duplicarse (+140 millones de turistas/año) en las costas mediterráneas. Este escenario resulta válido para áreas urbanas y costeras, pero no supone la reducción de la población rural del sur y el este, que se espera que se mantenga elevada, por lo menos hasta el 2025.

---

Los cambios en el uso del suelo afectarán a la dinámica espacial y causarán degradaciones medioambientales.

---

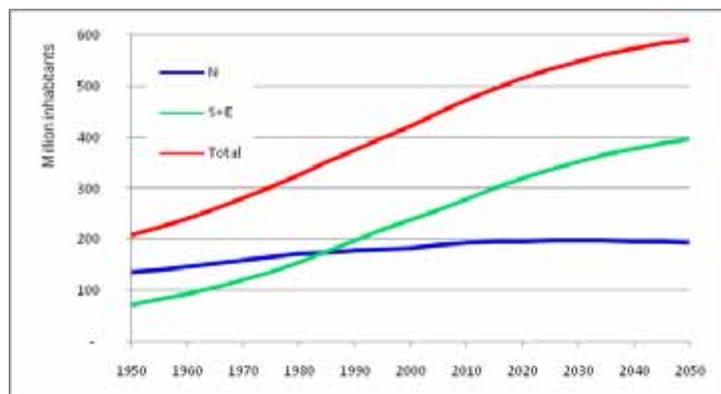


**Figura 63.** Índices de fertilidad sintética: evolución desde 1950 y proyecciones para 2050. Fuente: United Nations Population Division; World Population Prospects: revisión de 2006.

Al sur y al este el número de áreas cultivadas se ha multiplicado por un fenómeno de “hambre de suelo”. El impacto es más grave en los cinco países del norte de África (+40% en Marruecos y +28% en Egipto entre 1960 y 2000), en los que el suelo se ha reconvertido con dificultad a partir de pastos, bosques y desiertos. A pesar de que la intensidad de este fenómeno ha disminuido en los últimos años, se espera que la presión se mantenga alta en varios SEMCs, por lo menos hasta 2020, aumentando la deforestación y desertificación y agravando la degradación de los recursos. La degradación del suelo y la erosión son especialmente alarmantes en áreas muy pobres de montaña en las que se han llevado a cabo menos iniciativas de conservación y reforestación. El aumento de suelo de regadío, estimado en un 38% en el sur y un 58% en el este para 2030 (FAO) contribuirá a intensificar la presión sobre los recursos hídricos y los ecosistemas y a aumentar el riesgo de salinización del suelo.

Al norte, el rápido ritmo de expansión de bosques y matorrales se debería mantener hasta el 2025, a la vista del anunciado declive del número de agricultores y debido a los cambios en las prácticas agrícolas. El impacto de la biomasa forestal ocupando cada vez más suelo rural presenta aspectos positivos, tanto a nivel económico como ecológico, y aspectos negativos tales como el cierre del paisaje o una reducción de la flora del sotobosque. Sin embargo el impacto más significativo a nivel ecológico, económico y humano seguirá siendo el elevado riesgo de grandes incendios forestales.

El desarrollo implica la pérdida irreversible de la mayor parte de suelo cultivable en los SEMCs y esta tendencia resulta especialmente intensa en el norte. Se supone que esta tendencia se mantendrá en las llanuras costeras incrementando la impermeabilidad del suelo limitando la infiltración del agua y contribuyendo así al aumento del ries-



**Figura 64.** Evolución de la población mediterránea al Norte, Sur y Este para 2050. Fuente: United Nations World Population Prospects, 2008.

go de inundaciones. Casi el 50% de las zonas costeras podrían estar edificadas en 2025 (40% en 2000).

De continuar los cambios actuales en las áreas rurales, agrícolas, de pastoreo y forestales se agravarán diversos riesgos principales derivados de la insostenibilidad:

- desertificación y pobreza rural en los SEMCs
- impactos directos e indirectos: presión acumulada en las ciudades, incremento de la emigración rural, colmatación de presas y pérdida de biodiversidad
- pérdida del suelo agrícola de calidad debido a la expansión urbana y de infraestructuras (estimadas en más de 1,5 millones de hectáreas para 2025)
- recursos hídricos degradados y aumento de la vulnerabilidad a los incendios e inundaciones

Los riesgos del cambio climático global y los riesgos asociados al aumento del precio de la energía, materias primas y productos agrícolas se deben añadir a estos impactos.

El aumento de la demanda hídrica, tanto para agricultura como para industria o uso doméstico agrava la presión sobre el recurso.

De acuerdo con las predicciones del Plan Bleu de 2009, el crecimiento demográfico y el desarrollo económico aumentarán la demanda hídrica en el Mediterráneo, principalmente en los SEMCs, en otros 50 km<sup>3</sup> (18%) en 2025 hasta alcanzar los 330 km<sup>3</sup>/año.

Se espera que la agricultura siga siendo el principal consumidor de agua en los volúmenes necesarios para satisfacer las necesidades de riego. La demanda de agua potable también mantendrá un aumento para satisfacer las necesidades de la población estable –más y más concentrada en grandes ciudades– y de los turistas. A pesar de que la demanda de agua adicional inducida por el turismo sigue siendo modesta a escala anual,

Indices d'exploitation pays et bassins - 2025

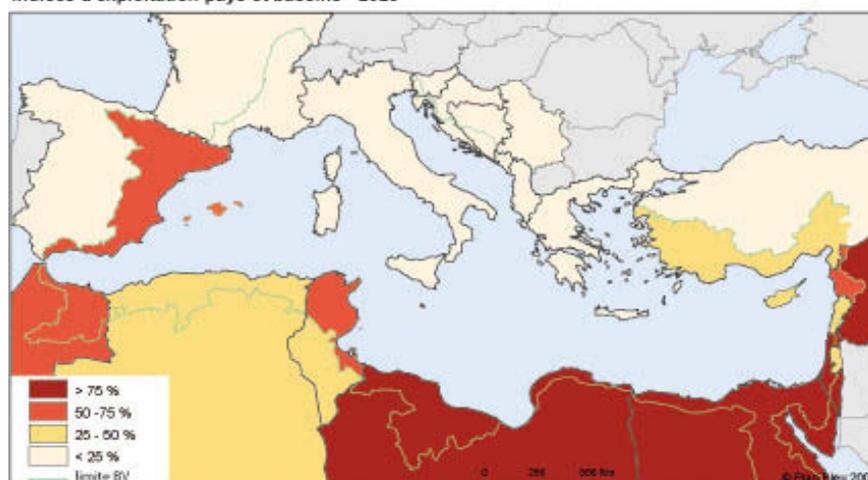


Figura 65. Índices de explotación de los recursos hídricos renovables en países individuales y por cuencas en 2025. Fuente: Plan Bleu.

no deja de ser problemática al coincidir con una mayor demanda de agua de riego durante un período en que los recursos están en su nivel más bajo.

Esta presión sobre los recursos hídricos, expresada con el índice de explotación de los recursos hídricos naturales renovables, pone de manifiesto los contrastes geográficos que, en algunos casos, resultan pesimistas con respecto al “futuro hidrológico” (Figura 65).

La presión sobre los recursos se puede multiplicar mucho más y amplificar los conflictos entre consumidores, comenzando por la competencia entre ciudades y la agricultura de regadío. Este escenario resulta aplicable también a los conflictos derivados del reparto del recurso entre regiones o países, en particular entre la cabecera y el tramo bajo de las cuencas transfronterizas (el Éufrates, el Jordán y el Nilo). A nivel más general, pueden generarse conflictos entre las necesidades de la población y los requerimientos para la conservación de la naturaleza, acrecentando las amenazas a los ecosistemas y limitando las posibilidades de conservación.

Los cambios de temperatura y precipitación descritos por los modelos climáticos agravarán aún más estas tendencias. La región mediterránea, ya sometida a un significativo estrés hídrico, estará más expuesta a la reducción de sus recursos hídricos. En los SEMCs, casi 290 millones de personas podrían tener que enfrentarse a una escasez hídrica en 2050 (Figura 66).

---

### Las nueva/s políticas ofrecen opciones para el progreso a través de una demanda hídrica mejorada y una gestión del suministro.

---

Si se debe satisfacer una demanda hídrica, en constante crecimiento, en el contexto actual de insuficiencia de recursos, su rarefacción, exceso de uso y calidad deteriorada aún más agravada por el impacto del cambio climático, resulta deseable y necesario poner a punto determinadas políticas orientadas a restaurar el equilibrio entre las necesidades de suministro y la gestión de una demanda hídrica en aumento. Tales políticas deben enfatizar:

- El consumo hídrico eficiente para las diferentes necesidades<sup>1</sup> por medio de instrumentos técnicos, económicos, reguladores o sociales.
- El aumento potencial de los recursos hídricos renovables mediante la recarga artificial de los niveles freáticos, el fraccionamiento de los trabajos de regulación (presas) en la cabecera de las cuencas así como iniciativas para promover la conservación del agua y del suelo (re-vegetación, prácticas de cultivo, infraestructuras, procesos biológicos). Estas medidas limitarán la colmatación en las presas, facilitarán la penetración del agua y su acumulación en suelo aireado y en los acuíferos, y reducirán las pérdidas por evaporación.
- La utilización de recursos hídricos poco convencionales (reutilización de aguas residuales tratadas para el riego, desalinización del mar o agua salobre para producir agua potable) e importación hídrica virtual<sup>2</sup> para limitar la presión sobre los recursos naturales.

---

<sup>1</sup> Los rendimientos actuales del uso del agua están lejos de ser satisfactorios. Las pérdidas, filtraciones y falta de aprovechamientos se estiman en un 40% de la demanda hídrica total en toda la región mediterránea. Las pérdidas son significativas debido al escaso mantenimiento de las redes hídricas, el hecho de estar obsoletas y al derroche de los diferentes usos (doméstico, industrial y agrícola debido a las técnicas de riego no adecuadas).

<sup>2</sup> Desarrollo de importaciones o reducción en exportaciones. El contenido hídrico virtual de bienes importados/exportados corresponde a la cantidad de agua consumida para su producción.

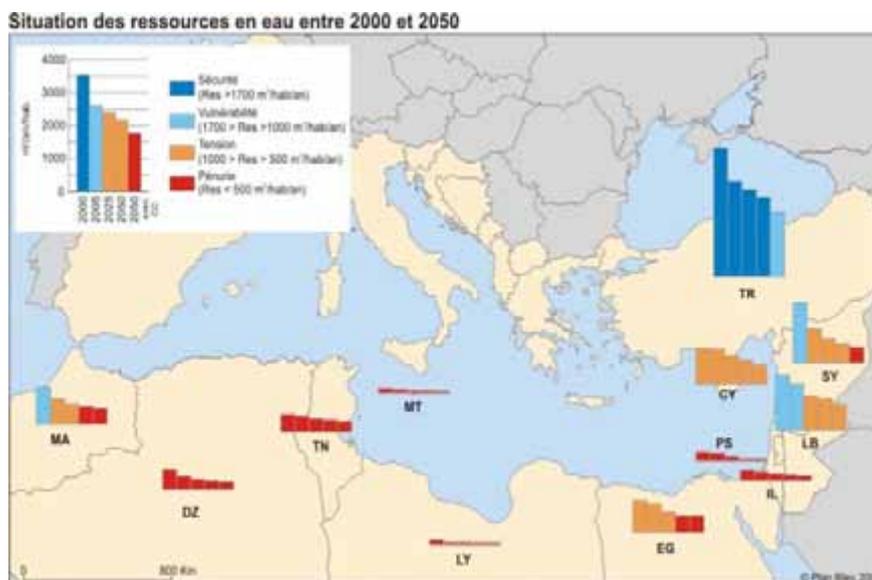


Figura 66. Evolución de los recursos hídricos *per cápita* en los SEMC entre 2000 y 2050. Fuente: Plan Bleu.

El potencial para progresar en esta vía resulta considerable puesto que una gestión mejorada de la demanda permitiría ahorrar una cuarta parte de las demandas, o 85 km<sup>3</sup> /año en el año 2025 (Figura 67). La agricultura de regadío representa el mayor potencial de ahorro en volumen, con casi un 65% del ahorro total identificado en el Mediterráneo.

Con esta perspectiva tan optimista, que se asume que se puede aplicar en general a todos los países mediterráneos, la demanda hídrica total se podría aproximar a los 105 km<sup>3</sup> / año en el Norte y 140 km<sup>3</sup>/año en el Sur y Oriente Próximo, lo que globalmente equivale a una reducción de 40 km<sup>3</sup>/año sobre la demanda actual total. Este ahorro hídrico también conducirá a una mayor eficiencia energética y ahorro financiero. Estas estimaciones generalistas basadas en experimentos concretos llevados a cabo en diferentes países, muestran que tal cambio resulta posible (Cuadro 26).

Las medidas para aumentar el potencial explotable de los recursos naturales explotables con un coste menor en energía, economía y medio ambiente ayudarían a restaurar el equilibrio del abanico de los recursos hídricos de la región.

---

La gestión sostenible de los recursos hídricos y su demanda deben basarse, por encima de todo, en un enfoque integrado a nivel de cuenca, y en el principio de solidaridad entre la cabecera y el tramo bajo, entre el interior y las zonas costeras.

---



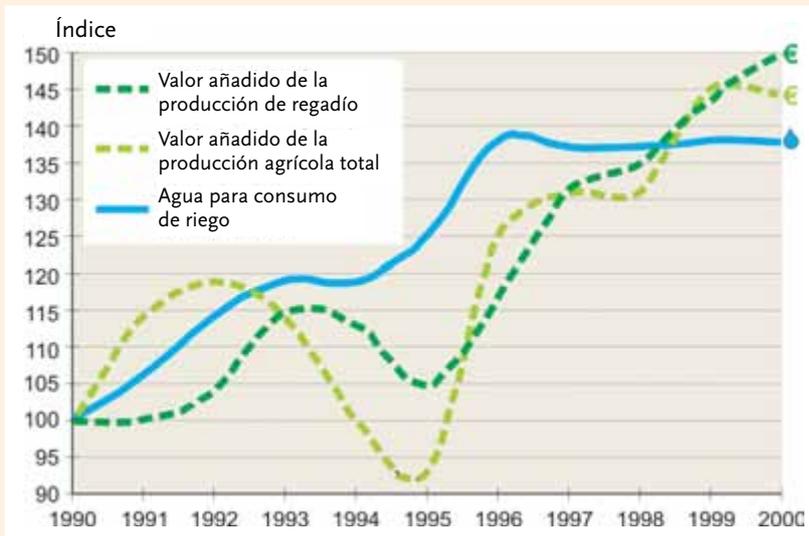
---

Las políticas deberían de tener en cuenta la riqueza del patrimonio de las áreas rurales mediterráneas y la diversidad de sus funciones como elementos principales y oportunidades para el futuro y adaptarlos al cambio. La gestión sostenible de estas áreas debería considerar sus múltiples funciones y orientarse hacia la prevención de los riesgos naturales como los incendios forestales y las inundaciones.

---

### Cuadro 26. Estrategia nacional para ahorrar agua de riego en Túnez

Túnez ha implementado una estrategia nacional para ahorrar agua de riego basada en la creación de asociaciones de consumidores, un modo de poner precio que ha conducido a la gradual recuperación de los costes e instrumentos financieros específicos para dotar de fondos a las instalaciones agrícolas con tecnologías de ahorro de agua y para favorecer los ingresos de los agricultores. Desde 1996, esta política ha estabilizado la demanda de agua de riego a pesar del significativo desarrollo del sector agrícola y ha asegurado las necesidades de la industria del turismo –fuente de dinero– y de las ciudades.



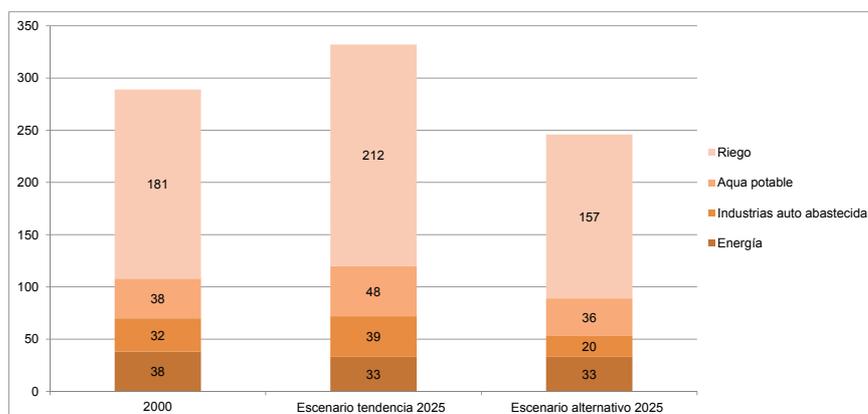
Consumo hídrico y valor añadido del riego en Túnez

Fuente: Plan Bleu, Hamdane, Fiuggi, 2002.

Los nuevos usos sociales de los ecosistemas naturales del Mediterráneo, la preocupación por la conservación de la biodiversidad y la lucha contra el cambio climático exigen grandes innovaciones en la gestión de las áreas rurales y forestales. El trabajo para lograr procesos más sostenibles supone cambios radicales de la “visión” de los papeles posibles y deseables de las áreas rurales y de sus correspondientes políticas nacionales de gestión.

Además de su papel como productores de biomasa, las áreas rurales, incluyendo los montes, cumplen muchas funciones medioambientales y sociales que resultan esenciales para todas las poblaciones mediterráneas:

- El papel ecológico de estas áreas asegura la calidad del entorno rural y de las zonas urbanas y periurbanas y, más allá de los equilibrios ecológicos costeros del tramo bajo, su función cubre la regulación y conservación de los recursos hídricos, suelo y biodiversidad, y la “producción” de agua y de depósitos de sedimentos en los ecosistemas costeros.
- Los ecosistemas forestales mediterráneos contribuyen a la compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero, a pesar de su relativamente baja capacidad de absorción de carbono. También suministran energía y materiales renovables.
- Las áreas rurales resultan también básicas para equilibrar las poblaciones urbanas y rurales. Si aumenta la concentración de población en ciudades y zonas costeras, se corre el riesgo de que se produzca descontento social y tener que hacer



**Figura 67.** Demanda de agua por sector de uso (km<sup>3</sup>/año), tendencia y escenarios alternativos 2005. Fuente: Plan Bleu.

frente a los altos costes derivados de la concentración de la contaminación. Así, el tema del empleo rural pasa a ser un factor determinante en la búsqueda de un equilibrio espacial y social viable.

- Las áreas rurales, dedicadas cada vez más a propósitos residenciales y actividades de ocio, ayudan a diversificar la oferta de la industria turística.

Las funciones múltiples de las áreas rurales, que se deberían considerar esenciales en los procesos de toma de decisiones, siguen sin ser suficientemente reconocidas. Los montes en particular, proporcionan servicios no comerciales, que no se reflejan en los mecanismos de mercado.

Así, los aspectos actualmente más importantes incluyen la gestión sostenible, financiación y remuneración de los bienes y servicios medioambientales proporcionados por los ecosistemas mediterráneos. Los economistas medioambientales tratan de medir los valores ecológicos y medioambientales totales de las áreas forestales, enfatizando la necesidad de reconocer su contribución social y medioambiental, indispensable para un desarrollo sostenible.

---

**Los enfoques territoriales son especialmente necesarios para asegurar la gestión sostenible de los recursos naturales, incluidos los bosques.**

---

Todas las estrategias de desarrollo rural sostenibles se deben basar en los siguientes paradigmas: integración, territorialidad, subsidiariedad, participación y asociación. Deben incluir, necesariamente, las áreas rurales y los montes dentro de objetivos más amplios que incluyan pequeñas ciudades y pueblos rurales.

Los planes directores y de gestión ayudan a definir los objetivos de desarrollo y las reglas y objetivos del uso de los recursos para proteger el equilibrio de los ecosistemas a largo plazo, a la vez que consideran los riesgos y evolución resultante de los impactos del cambio climático y del estrés hídrico en la región mediterránea.

Un gran número de países, en particular países altamente descentralizados como Espa-

ña e Italia, trabajan en enfoques territoriales de ese tipo que requieren cooperación entre las partes implicadas, tales como agentes económicos, asociaciones y autoridades locales. La participación de todas las partes interesadas permite la identificación de conflictos de intereses potenciales, ayuda a redefinir prioridades y a fijar reglas para el uso colectivo, y a definir mejor la financiación necesaria para una gestión sostenible de los recursos.

La inclusión de políticas forestales en todas las políticas de desarrollo territorial resulta más importante cuando, como ya hemos visto, el elevado valor del patrimonio de los montes mediterráneos surge de la multiplicidad de sus funciones. La gestión integrada sostenible de los montes puede restringir la planificación urbana de crecimiento continuo mediante la creación de parcelas verdes, contribuyendo a la diversificación del turismo por la promoción de las tierras interiores y la contribución a la lucha contra la pobreza y la desertificación. La integración de las políticas hídricas y forestales resulta indispensable para la gestión sostenible de los recursos naturales de las cuencas. Y, finalmente, la implementación de estrategias efectivas de prevención de incendios requiere de la total integración de todas las políticas actuales relacionadas con los incendios: desarrollo urbano, agrícola (incluyendo prácticas de producción de planta) derechos de la propiedad y de uso, etc.

---

La gestión sostenible de los recursos hídricos, y su demanda, y de las áreas rurales y montes debe elaborarse desde un enfoque integrado a nivel de la cuenca y con el principio de solidaridad cabecera-tramo bajo y entre tierras interiores y regiones costeras. Debe armonizar todas las políticas sectoriales: agricultura, energía, turismo, medioambiente, y desarrollo del suelo para facilitar el arbitraje de los recursos hídricos y de suelo asignados a los diferentes usos.

---

Las respuestas necesarias para afrontar los futuros retos en la gestión de los recursos hídricos y forestales del Mediterráneo que se derivan del crecimiento de la población y del cambio en el uso del suelo exceden con creces el ámbito único de las políticas hídrológicas y forestales.

### Lecturas recomendadas

- Blinda, M. and Thivet, G. 2009. Ressources et demandes en eau en Méditerranée, situation et perspectives. In: Science et changements planétaires Sécheresse vol. 20(1). Montrouge, John Libbey Eurotext. [www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro\\_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml](http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/49/C6/article.phtml)
- CIHEAM, UNEP-MAP-Plan Bleu, Hervieu, B. and Thibault, H.L. 2009. Mediterra 2009: Rethinking rural development in the Mediterranean. Paris, Presses de Sciences Po; CIHEAM.
- UNEP-MAP-Plan Bleu, Thibault, H.L. 2009. State of the Environment and Development in the Mediterranean. Athens, UNEP-MAP-Plan Bleu. [www.planbleu.org](http://www.planbleu.org)
- UNEP-MAP-Plan Bleu, Benoît G. and Comeau A. 2005. A sustainable future for the Mediterranean: the Blue Plan's environment and development outlook. London, Earthscan Publishers. [www.planbleu.org](http://www.planbleu.org)

## La aforestación para combatir la desertización de las zonas áridas exige aunar esfuerzos<sup>1</sup>

**Orna Reisman-Berman, Leopoldo Rojo y Pedro Berliner**

---

Los procesos biofísicos que conducen a la desertización consisten, principalmente, en el aumento de la escorrentía y la erosión del suelo como resultado de la reducción importante de la cubierta. Se pueden prevenir o recuperar por medio de la aforestación, si ésta se diseña adecuadamente, con la atención debida al equilibrio hídrico de la cuenca.

---

**A** lo largo de la historia moderna de la aforestación en la cuenca mediterránea, esta actividad ha tenido lugar en suelos degradados y deteriorados como áreas naturales sobrepastoreadas, bosques quemados y matorrales, campos agrícolas abandonados o áreas sometidas a tala rasa. En tales suelos, existe una importante amenaza de destrucción de la estructura del suelo, de pérdida de su fertilidad, productividad y biodiversidad, y de desarrollo de procesos de desertificación. En este capítulo discutiremos la sostenibilidad de la aforestación en ecosistemas proclives a sequías severas, concentrándonos en el Mediterráneo seco y en las áreas semiáridas situadas alrededor de la cuenca mediterránea.

En las zonas áridas, el sobrepastoreo, los incendios y todas las actividades antropogénicas que retiran la cubierta vegetal y desnudan el terreno, exponen peligrosamente la superficie del suelo a la erosión por el viento y el agua. Estas actividades también destruyen el manto biológico del suelo que, en zonas áridas, lo estabiliza y protege contra la erosión, regula la escorrentía y aporta nitrógeno y carbono al suelo. Las tormentas que afectan a los suelos degradados, aceleran el proceso de destrucción de la estructura del suelo y, de este modo, aceleran los procesos de desertificación. Las gotas de lluvia que impactan sobre el suelo desnudo destruyen los agregados de su superficie y, como resultado, se forma una densa costra física y aumenta la escorrentía. El flujo de agua incontrolado, puede volverse turbulento en terrenos con pendiente, y cargarse con las partículas de suelo superficial desprendidas. Las áreas cubiertas por extensas costras son susceptibles de inundación. Una vez pasada la inundación el material erosionado cubre las capas superiores fértiles del suelo, contribuyendo aún más a la destrucción de

---

<sup>1</sup> Ver también las secciones 1.5 y 4.3

### Cuadro 27. Definición de desertificación

- “Desertificación” significa degradación del suelo en áreas subhúmedas, áridas, semiáridas y secas como resultado de varios factores, incluyendo variaciones climáticas y actividades humanas.
- “Combatir la desertificación” incluye actividades que forman parte del desarrollo integrado del suelo en áreas áridas, semiáridas, subhúmedas y secas para un desarrollo sostenible...”

Fuente: UN Convention to Combat Desertification <http://www.unccd.int/convention/text/convention.php?annexNo=1>.

la estructura del suelo, deteriorando así las actividades agrícolas en las áreas de cultivo. En suelos tan degradados, la pérdida de fertilidad se acompaña de un importante descenso de la disponibilidad de agua, limitando la regeneración de las especies herbáceas anuales así como de los árboles y matorrales. El descenso creciente de disponibilidad de agua y la pérdida continuada de cubierta vegetal constituyen un círculo vicioso, de manera que las áreas que fueron fértiles y vegetadas se transforman en paisajes inhóspitos atravesados por profundos barrancos. La Figura 68 ilustra la sensibilidad a la desertificación del norte del Mediterráneo.

Así, la reducción de la cubierta vegetal es la principal causa de los fenómenos en cadena que conduce a la desertificación. Para prevenir y combatir la desertificación resulta necesario mantener una cubierta vegetal estable, por lo menos durante la estación lluviosa, o conseguir la instalación de una cubierta en los suelos que tienen riesgo de desertificación. Las hojas absorben la energía de las gotas de lluvia gracias al impacto sobre su superficie y disminuyen la energía de las gotas antes de que lleguen al suelo. Por lo tanto la cubierta reduce significativamente la destrucción de los agregados superficiales y previene la formación de una costra física sobre el suelo y la consiguiente inundación. La retención de gotas de lluvia en las hojas del dosel forestal y la reducción de la infiltración de lluvia en el suelo resulta particularmente importante durante las fuertes tormentas que, con frecuencia, azotan el área mediterránea durante la primavera y el otoño, cuando la cubierta vegetal anual es escasa. Así, la aforestación con especies perennes o semiperennes proporcionaría, idealmente, el dosel esencial durante las estaciones cruciales.

La aforestación a gran escala de áreas desertificadas puede afectar al equilibrio hídrico de las cuencas. Los experimentos de campo a gran escala (12 km<sup>2</sup>) llevados a cabo en una plantación de pino carrasco de 30 años de edad en el área de transición entre el Mediterráneo y las zonas semiáridas (285 mm de lluvia anual), demostraron que la escorrentía no resultaba importante incluso ni durante tormentas de alta intensidad. El aumento del agua almacenada en el perfil del suelo no tuvo como resultado la percolación del agua más abajo de la zona de las raíces, y por ello no hubo recarga del acuífero. El agua se utilizó con eficiencia por los árboles y el sotobosque efímero. El uso eficiente del agua disponible, por parte de los árboles, aumenta el uso de energía y disminuye la temperatura superficial. Este proceso es determinante para revertir la desertificación. La presencia de árboles puede, así, reducir la generación de flujos de agua y, por lo tanto, la erosión. Se deduce pues que la aforestación es una herramienta eficiente, tanto para prevenir la desertificación, como para revertirla en suelos agrícolas en desuso y en áreas naturales perturbadas.

---

La aforestación en zonas áridas y semiáridas requiere técnicas de retención de agua como la formación de estructuras aterrazadas en bancales o la construcción de pequeñas barreras que ayuden a embalsar el agua

---

Sin embargo no es una tarea fácil establecer bosques sostenibles en las zonas secas de la cuenca mediterránea, que se caracterizan por bajas precipitaciones y elevada evapotranspiración potencial, incluso en invierno. A mediados del siglo XIX los silvicultores ya eran conscientes de la degradación de los ecosistemas forestales mediterráneos— y sus consecuencias sobre la erosión del suelo— y el aumento de las inundaciones catastróficas. Se instituyeron actividades encaminadas a la rehabilitación de los ecosistemas para promover la aforestación, en particular en las cabeceras de las cuencas hidrológicas torrenciales. Como resultado, los planes de aforestación extensiva se desarrollaron en el siglo XX en la mayoría de los países mediterráneos. En España, por ejemplo, se aforestaron más de cuatro millones de hectáreas o un 9% del total del territorio nacional y un 18% del suelo potencialmente forestal. Las retroalimentaciones positivas entre el suelo y el agua tras la aforestación, permiten mejorar la disponibilidad hídrica para las plantas introducidas en el suelo degradado. Se puede conseguir gracias a varios métodos complementarios:

- i) Preparación del suelo antes de plantar para aumentar la infiltración de agua y la capacidad de retener agua en el suelo, especialmente con técnicas de captación de la escorrentía.
- ii) Selección cuidadosa de las especies leñosas y ecotipos que pueden tolerar las condiciones de estrés de los suelos degradados.
- iii) Aclimatación de los árboles jóvenes en viveros para resistir condiciones de sequía.
- iv) Uso de acondicionadores micro climáticos como las barreras de protección.

Desde los tiempos de los Nabateos (100 a.C.–50 a.C.) y los Bizantinos (324 a.C.–640 a.C.) se han desarrollado técnicas para superar el desequilibrio intrínseco entre la demanda de un suministro hídrico estable por parte de la agricultura y la evaporación, transformando la potencial maldición de la inundación en una bendición. Cisternas de agua, regulación de la inundación y captura de la escorrentía son algunos de los términos utilizados para describir la captura del agua de escorrentía en estructuras que se hacen a medida de la geomorfología. El principio de este ingenioso sistema es extremadamente simple: la escorrentía generada naturalmente se concentra desde un área grande al interior de áreas más pequeñas y queda atrapada allí. Como resultado, la profundidad del agua en la cuenca será mucho mayor que el “nivel de precipitación”, y lo que es más importante, permitirá almacenar suficiente agua como para permitir el desarrollo normal de un cultivo, si bien en un área reducida. En estos microlugares la disponibilidad de agua es mucho mayor que en los alrededores. Un ejemplo de la aplicación moderna de este enfoque para la aforestación a gran escala es el que se practica en el área de transición entre el Mediterráneo y el desierto semiárido del Negev, en Israel (precipitación anual: 50–300 mm). En este caso se plantaron plántulas a lo largo de un montículo de tierra como una terraza, construido siguiendo la línea de pendiente (Figura 69 A,B). En el área localizada entre dos bancales vecinos se produce escorrentía en el bancal “fuente”, y se recoge en el bancal más bajo, “sumidero” en el que se instalan las plántulas.

tulas. La distancia entre bancales y el tipo de suelo determinan la cantidad de escorrentía que se produce; por ejemplo, las superficies rocosas producen más escorrentía. De un modo parecido, sobre suelos en los que existe una capa biológica, las superficies con incrustaciones producen más escorrentía entre las terrazas que las superficies de suelo degradado. En las zonas con bancales, la supervivencia de los árboles es considerablemente mayor y la erosión está controlada. Se pueden construir los bancales con una mínima perturbación del suelo excavando una pequeña zanja y formando los terraplenes de suelo a lo largo de las cotas topográficas. De esta manera el área entre las terrazas se mantiene casi intacta. Este tipo de aforestación se conoce como “sabanización”, un término que describe un diseño de plantación relativamente difuso, en el que se deja espacio entre las terrazas y entre los árboles a lo largo de una cota. La técnica de abancalamiento es una tecnología de gestión efectiva a nivel de la cuenca. Una ventaja adicional es su impacto sobre la biodiversidad y la productividad del bosque. La alta humedad del suelo bajo las terrazas mejora el establecimiento de las especies herbáceas anuales y se da un considerable aumento de la biomasa en las terrazas. De modo similar, la biodiversidad de las especies sobre los terraplenes de las terrazas es mayor que en las áreas de suelo con costra entre terrazas. Por lo tanto, en las áreas secas aterrazadas, el hecho de aumentar el número de bancales puede contribuir a aumentar la biomasa vegetal y la biodiversidad de las especies. Así, se mantienen los servicios de los ecosistemas y se puede integrar el pastoreo al ecosistema forestal. Otro tipo de construcción aplicado en el desierto del Negev para captar la escorrentía es el *liman* (limen y limne significan, respectivamente, puerto y lago en griego; Figura 69 C,D) que consiste en un área de la cuenca en la que se construyen presas de cota baja mediante muros de contención que atrapan el agua de escorrentía de las ramblas.

Los protectores para árboles, cilindros de vinilo que se colocan individualmente alrededor de las plántulas, forman un microambiente de sombra alrededor del árbol reduciendo la evapotranspiración y promoviendo la supervivencia del mismo. La altura del árbol también aumenta a causa del efecto de la sombra. Los árboles de *Quercus ilex* protegidos, por ejemplo, pueden alcanzar el doble de altura que los no protegidos, en tan sólo dos años. En climas cálidos se recomienda usar protectores ventilados para reducir la temperatura en el interior del cilindro. Del mismo modo, la cubierta del dosel existente puede facilitar el establecimiento de las especies leñosas bajo condiciones ambientales estresantes. El efecto de la sombra se discutirá al final de este capítulo en relación con la regeneración espontánea.



Figura 68. Sensibilidad a la desertificación en el Mediterráneo norte, 2005. Fuente: EEA.

---

La agroforestería puede incrementar la productividad de la aforestación en los terrenos secos.

---

En las áreas aforestadas en las que el suelo es lo bastante profundo (campos de cultivo abandonados, por ejemplo) el área entre los bancales se puede usar para cultivos a pequeña escala, una práctica conocida como agroforestería. La técnica es común en las áreas más húmedas del Mediterráneo y se basa en intercalar cultivos entre las hileras de árboles o crear una sabana abierta con arbolado poco denso que permita los cultivos en su interior. Ejemplos conocidos son la *dehesa* en España o el *montado* en Portugal, que son sistemas agroforestales en bosques claros creados por el hombre.

La agroforestería no resulta una práctica común en áreas secas. Sin embargo, incluso en áreas más secas, la concentración de escorrentía en una parcela de tierra relativamente grande puede aumentar la disponibilidad hídrica de manera que a principio de verano el contenido hídrico del suelo sea similar al de las zonas húmedas. Este sistema se conoce como sistema agroforestal de la escorrentía (RAS). El área de la superficie que contribuye a la escorrentía se planifica de tal manera que la escorrentía generada se extiende sobre el área cultivada y humedece el suelo a una profundidad predeterminada. El tamaño óptimo de una parcela receptora de escorrentía es de aproximadamente una hectárea, que es el área máxima que se puede nivelar a mano satisfactoriamente (para asegurar que el agua se extienda homogéneamente) y permite su cultivo de manera viable.

---

La regeneración de la cubierta y el sotobosque en las aforestaciones llevadas a cabo en las áreas secas es el principal obstáculo para la sostenibilidad de los bosques. Sin embargo el fomento de la regeneración con especies nativas en los bosques de zonas áridas puede incrementar las especies y la diversidad estructural así como los servicios de los ecosistemas.

---

**Figura 69.** A,B. (izquierda) Aforestación con bancales en curva de nivel en el Negev, Israel. Se disponen plantones a lo largo de montículos bajos que se construyen siguiendo el nivel de la pendiente. C,D (derecha) Un liman es una cuenca hidrológica plantada. Fotos de B. Bookend y <http://desert.bgu.ac.il/desert/>.



Las actividades de aforestación en las zonas áridas están diseñadas para dar soporte a múltiples servicios de los ecosistemas para el hombre y el entorno. Estos servicios incluyen el ocio, el mantenimiento de un microclima fresco, la conservación del suelo, su regeneración, conservación hídrica, recarga de agua subterránea, prevención del polvo y de la inundación, producción de forraje y la conservación de la biodiversidad. Dados los escasos recursos disponibles en zonas áridas, resulta crucial diseñar las aforestaciones con vistas a maximizar la provisión de los servicios de los ecosistemas, a pesar de las dificultades inherentes al establecimiento de bosques sostenibles en las zonas áridas. El sotobosque, un componente importante del bosque que contribuye a la diversidad de sus especies y a su complejidad estructural, puede proporcionar muchos de los servicios ecosistémicos, incluyendo forraje para el ganado y las abejas (que producen miel) así como servicios culturales y estéticos. En las zonas áridas, sin embargo, resulta difícil diseñar un bosque que de soporte a un sotobosque. En principio, la aforestación en ecosistemas áridos crea un ecosistema nuevo que altera drásticamente el suelo original, matorral o pasto natural o degradado, o suelo agrícola que no se utiliza. Este tipo de ecosistema forestal nuevo forma un entorno diferente del que lo rodea, sea natural o cultivado, en el que los árboles plantados modifican el microclima, la cubierta del suelo, su estructura superficial, sus propiedades y todos los recursos disponibles así como el hábitat de muchos animales y plantas. En las zonas áridas el acervo regional de especies no comprende un conjunto bien adaptado de especies de sotobosque, sino que está compuesto de especies de pastos o matorrales de las áreas circundantes. Por lo tanto, el desarrollo de vegetación de sotobosque en un área aforestada contribuye a la conectividad del paisaje y mitiga los efectos de su fragmentación que son resultado de la propia aforestación y de cualquier degradación previa del suelo. Formar un bosque que sustente un sotobosque puede requerir un esfuerzo adicional, puesto que las especies forestales se seleccionan básicamente por su tolerancia a la sequía y su rápido crecimiento y establecimiento, y no necesariamente por su capacidad de dar soporte al establecimiento del sotobosque. Algunas de las especies que mejor toleran la sequía, como algunas especies de *Eucalyptus*, inhiben el establecimiento de la planta bajo su dosel (p.ej. por alelopatía). Una posible solución a este problema podría ser la “sabanización”, una práctica de aforestación que permite el establecimiento de un sotobosque por el diseño poco denso de la plantación y la formación de claros en el dosel que satisfacen los requisitos de luz de las especies nativas. Por ello se recomienda que, con el fin de estimular la regeneración y el establecimiento de especies nativas en la aforestación de zonas áridas, las especies de árboles se seleccionen de acuerdo con su interacción con las especies nativas y se planten a una densidad no muy elevada.

Uno de los mayores obstáculos para la aforestación de las zonas áridas es la regeneración limitada del dosel y de las especies nativas (de árboles) en las plantaciones; por ejemplo, en la plantación de pino carrasco en el área de transición entre el Mediterráneo y las zonas semiáridas (285 mm de lluvia) los pinos del dosel no regeneran. Los estudios llevados a cabo hasta la fecha no han podido elucidar las causas ni desarrollar las herramientas para superar el problema. En la zona seca mediterránea (400 mm de lluvia), las especies de pino del dosel han regenerado con éxito; sin embargo, la regeneración de las especies nativas de hoja ancha en las plantaciones de pino es muy limitada. Los estudios han concluido que la sombra del dosel favorece el establecimiento de las encinas en los estadios iniciales y que la sombra moderada (50–70%) resulta muy eficiente para favorecer la supervivencia de las plantaciones de encinas. El desarrollo de las plántulas de encina resulta mucho más vigoroso en los claros de los bosques. En los ecosis-

temas proclives a la sequía, puesto que la sombra puede mejorar las relaciones hídricas de la planta, el estrés producido por la falta de luz resulta menos importante. Una forma práctica de regenerar las especies leñosas consistiría en formar un medio sombreado durante las etapas iniciales del establecimiento de las especies del sotobosque para exponer a los jóvenes árboles a la luz, en etapas posteriores, creando claros en el bosque.

### Lecturas recomendadas

- <http://desert.bgu.ac.il/desert/EngDefault.aspx>
- Ben-Asher, J. and Berliner, P.R. 1994. Runoff irrigation. In: Tanji, K.K. and Yaron, B. (eds.). *Management of Water Use in Agriculture*, Chapter 6. Springer Verlag.
- Evenari, M., Shanan, L. and Tadmor, N. 1982. *The Negev: The Challenge of a Desert*, 2nd Edition. Cambridge, MA; Harvard University Press. 437 p.
- Lovenstein, H., Berliner, P.R. and van Keulen, H. 1991. Runoff agroforestry in arid lands. *Forest Ecology and Management* 45: 59–70.
- Reisman-Berman, O., Age-related change in canopy traits shifts conspecific facilitation to interference in a semi-arid shrubland. *Ecography* 30: 459–470.
- Rojo, L., Vallejo, V.R. and Valdecantos, A. 2009. Forest and natural landscapes. LUCINDA, EC Specific Support Action. Booklet series C, nr 1. Universidade Lusófona & FCSH (Universidade Nova de Lisboa), <http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/>
- Vallejo, V.R., Aronson, J., Pausas, J. and Cortina, J. 2006. Restoration of Mediterranean Woodlands. In: *Restoration Ecology. The New Frontier*. J. Van Andel and J. Aronson (eds.). Blackwell Publ., Oxford. Pp. 193–207.

## Mantener saludables los ecosistemas acuáticos y de ribera del Mediterráneo: retos y soluciones mediante la gestión de los bosques de ribera

Francesc Sabater y Susana Bernal

---

Los bosques de ribera juegan un papel principal en el mantenimiento de la biodiversidad, la regulación de los flujos de energía y nutrientes entre los medios acuático y terrestre y en el mantenimiento saludable de los ecosistemas acuáticos adyacentes y los recursos hidrológicos. En el Mediterráneo, su futuro está en peligro por el aumento de la sequía, el uso excesivo del agua y la contaminación.

---

Las zonas de ribera constituyen fronteras ecológicas entre los ecosistemas terrestres y acuáticos. Son definidas por los ecólogos como auténticos ecotonos y, como tales, abarcan intensos gradientes de condiciones ambientales, procesos ecológicos y comunidades de plantas. En la cabecera de los ríos, las riberas están formadas, a menudo, por estrechas franjas de vegetación adyacentes al canal, mientras que en las tierras bajas se caracterizan por extensas llanuras de inundación cubiertas de bosque.

A causa de su papel crítico en el mantenimiento de la biodiversidad y en la regulación de la energía y los flujos de nutrientes entre los ambientes terrestre y acuático, los bosques de ribera han sido objeto de gran interés por parte de muchos científicos y gestores medioambientales durante las últimas décadas. Aquí identificamos un grupo de funciones clave de los ecosistemas a tener en cuenta a la hora de diseñar códigos para la gestión adecuada de estos ecosistemas tan valorados, haciendo énfasis en el papel que juegan en las regiones mediterráneas áridas y semiáridas.

Los bosques de ribera juegan un papel fundamental en el mantenimiento saludable de los ecosistemas acuáticos adyacentes. En primer lugar, el sombreado del canal del río el dosel del bosque regula la productividad primaria del río y amortigua la temperatura del agua, lo que resulta particularmente importante en las áreas semiáridas para asegurar la supervivencia de algunas especies de peces como los salmónidos. Segundo, suministran grandes cantidades de hojarasca de gran calidad –una importante fuente



**Figura 70.** Bosque de ribera dominado por alisos (*Alnus glutinosa*) en la cabecera de una cuenca mediterránea, La Tordera, NE de España. Foto de F. Sabater.

de alimentación para los insectos acuáticos– y gruesos restos leñosos que aumentan la rugosidad del canal y reducen el flujo de energía, contribuyendo a mejorar la concentración de nutrientes y la retención de sedimentos, la diversidad de hábitats de la curso de agua y su productividad.

Se sabe que el complejo radical y el sotobosque de los bosques de ribera previenen con efectividad contra la erosión del suelo y contribuyen a la estabilización de los márgenes. Los bosques de ribera actúan como una barrera contra la perturbación del suelo causada por la agricultura de los campos de cultivo cercanos, y retiene sedimentos de las aguas de drenaje. Este efecto amortiguador resulta de particular importancia en las regiones mediterráneas en las que las inundaciones súbitas son frecuentes y tienen un gran poder de destrucción. Ciertamente, el control de la erosión por parte de los ecosistemas de ribera contribuye a proteger la calidad del agua del río, previene la colmatación y mantiene un canal profundo adecuado para las comunidades acuáticas, especialmente peces.

La proximidad de los bosques de ribera a las fuentes de agua superficiales y subsuperficiales permite el establecimiento de comunidades de plantas únicas que no se pueden encontrar en ningún otro lugar de la cuenca (Figura 70). El acceso a los recursos hídricos permite la evapotranspiración continua, de los árboles de ribera, durante el período vegetativo, manteniendo altos los niveles de humedad relativa. Las condiciones ambientales de los ecosistemas mediterráneos de ribera son, típicamente, las más húmedas y frescas de todo el paisaje, y el pronunciado gradiente de temperatura y humedad permite un abanico de hábitats de vida silvestre. Las zonas de ribera son también puntos calientes para la fauna, al ofrecer simultáneamente tres recursos esenciales: agua –un bien escaso en las áreas mediterráneas–, alimento y refugio. Es más, la configuración lineal de los bosques de ribera facilita su papel como corredores biológicos, o como vías preferenciales de difusión, dispersión y migración de especies de plantas y animales.

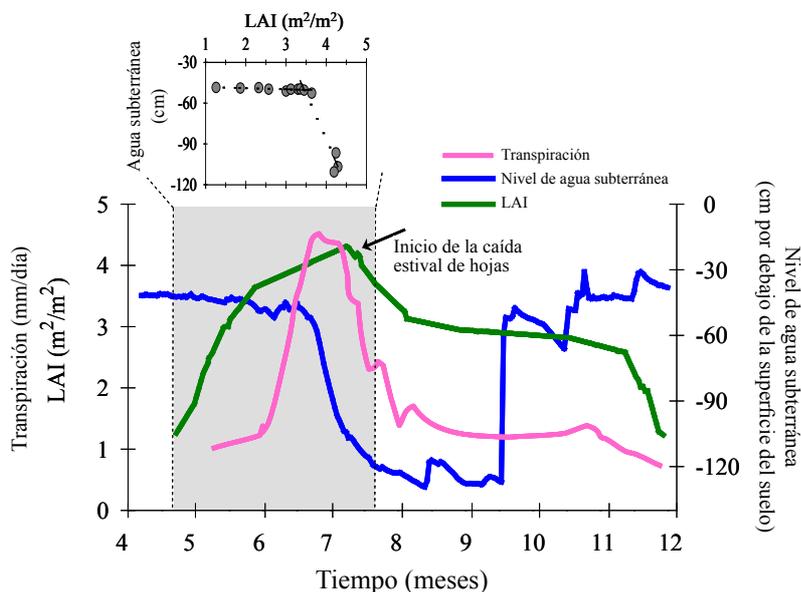
---

**Los bosques de ribera afectan al balance hídrico anual reduciendo la descarga hídrica.**

---

Los árboles de ribera, conocidos como **evitadores de sequía**, son especies de hoja caduca y freatófitos facultativos, en contraposición a las especies esclerófilas usadas en las condiciones de estrés hídrico que predomina en el paisaje mediterráneo. La evapotranspiración en los bosques de ribera puede ser un componente básico del balance hídrico anual en las cuencas áridas y semiáridas. Por ejemplo, una franja boscosa de ribera en Nuevo México redujo de un 20% a un 33% el régimen hídrico anual en una cuenca árida con una precipitación anual de 200–300 mm. En una cuenca mediterránea densamente forestada al noreste de España (precipitación anual de unos 600 mm), sin embargo, la contribución de la evapotranspiración del bosque de ribera al régimen hídrico anual fue modesto (<5%). Sin embargo, la evapotranspiración real del bosque de ribera fue, sobre una media de 510 mm (entre 2 y 5 mm/día), es decir el 70% de la evapotranspiración potencial durante el período vegetativo (de abril a octubre). Estos valores indican que los árboles de ribera de las regiones mediterráneas pueden tener un impacto desproporcionado sobre el balance hídrico de las cuencas, en particular, durante la primavera y verano cuando los recursos hídricos son más limitados.

La Figura 71 muestra que la transpiración de los árboles de ribera ejerció una fuerte influencia sobre el nivel de las aguas subterráneas durante el período de evapotranspiración máxima – cuando el dosel estaba totalmente desarrollado–. Durante un período de dos semanas el nivel de aguas subterráneas del margen sufrió un abrupto declive de 54 cm a un ritmo de 3,5 cm al día, o unos 4,6mm al día coincidiendo con valores medidos de la evapotranspiración de los árboles de la ribera. Es de remarcar que el impacto de la evapotranspiración sobre el nivel de las aguas subterráneas fue especialmente notable para índices de área foliar por encima de 3,5 m<sup>2</sup> (Figura 71, recuadro), y los árboles de ribera empezaron a perder hojas después de que las aguas subterráneas bajasen por



**Figura 71.** Nivel de agua subterránea en la ribera, en un piezómetro situado a 5 m de canal del arroyo Fuirosos y promedio de transpiración de dos especies de árboles (*Alnus glutinosa* y *Platanus acerifolia*) localizados en las cercanías, durante el período vegetativo de 1998–1999. También se muestra el índice foliar (LAI) en la parcela de la ribera del Fuirosos. La tabla incluida muestra la relación entre el nivel de agua subterránea y el LAI durante el período de desarrollo del dosel. La flecha negra indica el inicio de la caída estival de hojas, que tuvo lugar poco después del abrupto descenso del nivel de agua subterránea. El arroyo Fuirosos se encuentra en el Parque Natural de Montenegro-Corredor (NE de España) en el que la precipitación media anual es de 600 mm. Modificado de: Ester Nin, Tesina, 2000, Universidad de Barcelona.

debajo de 120cm de la superficie del suelo y el sistema radical se desconectase del nivel de las aguas subterráneas. Estas observaciones sugieren que los densos doseles de ribera pueden provocar estrés hídrico, lo que puede causar una disminución en la recarga del río e incluso dar lugar a la intermitencia del caudal, en cuencas semiáridas, durante el período de sequía. A pesar de la influencia de los bosques de ribera sobre la descarga de agua, este compartimento ha sido ignorado durante mucho tiempo en los modelos hidrológicos de cuencas. La mayoría de estos modelos se desarrollan para cuencas húmedas, pero fallan al simular el caudal cuando se aplican a cuencas semiáridas. Los nuevos enfoques de los modelos, que incluyen un compartimento de agua subterránea de ribera, llegan a la conclusión de que el acuífero del margen del río resulta clave al simular las descargas del río durante los períodos de sequía en las cuencas mediterráneas.

---

Los bosques de ribera actúan como filtro de los agentes contaminantes y mejoran la calidad del agua.

---

### Cuadro 28. Recomendaciones para gestionar bosques de ribera

- Si el objetivo es mantener alta la biodiversidad y los hábitats de vida silvestre, se pueden preservar los bosques de ribera maduros prohibiendo todo tipo de cortas o permitiendo sólo la poda selectiva a lo largo de las riberas de los arroyos. Se debe mantener un buen número de árboles viejos en pie puesto que suministran restos gruesos de madera al ambiente del arroyo y mejoran la retención de nutrientes del arroyo y la calidad de los hábitats acuáticos. Se debe dejar siempre un número adecuado de árboles en las orillas para asegurar una buena sombra sobre el canal.
- Se deben mantener vigorosas las capas herbáceas y de matorrales puesto que mejoran la estabilización de la intercepción de los sedimentos del suelo de la ribera durante las inundaciones. Se debe vallar para evitar que el ganado circule por las zonas de ribera.
- Para mejorar la capacidad de los bosques de ribera para retener nutrientes del agua subterránea, que llegan de los suelos adyacentes, se debe mantener una demanda alta de nutrientes y prevenir la saturación manteniendo los bosques en estado sucesional entre temprano y medio con un programa activo de corta para la regeneración del arbolado. Resulta especialmente importante al tratar con zonas de ribera mediterráneas próximas a campos de cultivo sujetos a operaciones de fertilización a gran escala. Es importante darse cuenta de que la capacidad de amortiguación de los bosques de ribera depende de la geomorfología, topografía, composición de las especies y amplitud de la franja, entre otros factores. En cuanto a la amplitud de la franja ribereña, se necesita un mínimo de 5–30 m para reducir, al menos, el 50% de la entrada de nutrientes en el agua subterránea.
- Si se recomienda una poda selectiva, se debe minimizar la perturbación del suelo durante las prácticas silvícolas. Se deben mantener los retoños. También es necesario evitar el uso de maquinaria forestal y usar en su lugar caballos para la extracción de la madera cuando sea posible. Los métodos tradicionales de gestión de bosques de ribera, que mejoran la diversificación del hábitat de vida salvaje, como el aclareo selectivo, resultan preferibles.
- Se debe permitir la regeneración natural de los bosques de ribera, preferiblemente con especies nativas apropiadas de acuerdo con el clima local y el régimen hídrico. Es importante evitar especies oportunistas y controlar la invasión de especies exóticas talándolas o rociándolas con herbicidas tan pronto como sea posible.
- En general, los bosques de ribera y las zonas húmedas son valiosos ecosistemas para el paisaje local y, como tales, merecen una cuidadosa gestión de su estructura y composición, para mantener, e incluso mejorar, su belleza visual y mantenerlas estéticamente agradables.

La capacidad de las zonas de ribera para retener nutrientes, pesticidas y otros contaminantes de las aguas subterráneas que llegan de las proximidades está ampliamente reconocida. En particular, existe un amplio cuerpo de conocimientos sobre la capacidad de los bosques de ribera para amortiguar las cargas de nitratos de las aguas subterráneas que llegan de las áreas agrícolas adyacentes. En términos anuales, las áreas de ribera de las regiones templadas pueden reducir al menos un 30% de la carga de nitratos de las aguas subterráneas. Se han encontrado resultados similares para las regiones mediterráneas; por ejemplo, se ha documentado un descenso del 10% de nitratos por metro de agua subterránea en un bosque de ribera. La eliminación de nitrato de las aguas subterráneas tiene lugar mediante la absorción de la vegetación y la desnitrificación microbiana— la reducción de nitrato a gas en condiciones anaeróbicas—. En las áreas de ribera mediterráneas, los suelos no suelen estar saturados de agua y las tasas de desnitrificación son muy bajas ( $<20\text{mg N}_2\text{O-N/m}^2/\text{año}$ ; es decir, un orden de magnitud menor que los valores registrados en zonas de ribera templadas). Como consecuencia, este proceso microbiano elimina, anualmente, sólo una pequeña proporción ( $<1\%$ ) del nitrógeno de los sistemas de ribera mediterráneos, lo que implica que la asimilación por parte de la vegetación — árboles de ribera en particular— es la principal causa de eliminación de nitrógeno de las aguas subterráneas.

---

La gestión de los bosques de ribera constituye una herramienta para mejorar la calidad del agua y para proteger los hábitats de la ribera y el río, una necesidad en los vulnerables entornos mediterráneos pero un tema político que se suele pasar por alto.

---

En general, las investigaciones que se han llevado a cabo en las regiones semiáridas ponen de manifiesto que los árboles de ribera pueden mejorar sustancialmente la calidad de las aguas subterráneas, aunque su demanda evaporativa puede, potencialmente, reducir la disponibilidad de agua y la descarga de las cuencas. Los ecólogos hallaron que, en los bosques de ribera mediterráneos, existe un compromiso crítico entre el consumo de agua y su calidad, que se debe evaluar, al gestionar estos ecosistemas. Sugerimos una gestión proactiva de los bosques de ribera con objeto de mejorar la calidad hídrica y / o la protección de los hábitats de vida silvestre de la ribera y el río, principalmente en los países mediterráneos donde los medios acuáticos y de ribera son especialmente vulnerables a las perturbaciones antropogénicas. El cuadro 25 proporciona una breve lista de recomendaciones para la correcta gestión de los bosques de ribera mediterráneos.

Muchos gestores hídricos y medioambientales reconocen ya que los bosques de ribera son beneficiosos para la calidad hídrica y los ecosistemas de agua dulce. Sin embargo, y a pesar de todos los servicios que ofrecen los ecosistemas de ribera, anteriormente mencionados, prácticamente no se tienen en consideración en la Directiva Marco Europea del Agua (WFD) (2000/960/EC): no se hace mención en absoluto al modo en que estas áreas pueden contribuir al desarrollo de la WFD, ni tampoco se ofrece ninguna recomendación acerca de su protección o restauración. Creemos que las zonas húmedas en general y los bosques de ribera, en particular, son áreas de especial interés en las regiones mediterráneas en las que la presión humana sobre los recursos hídricos es extremadamente alta.

### Agradecimientos

Los autores quisieran agradecer a Esther Nin por su valiosa contribución en la investigación del bosque de ribera. Al Ministerio de Educación y Ciencia español por su apoyo económico, a través de MONTES-CONSOLIDER (Spanish Woodlands and Global Change: Threats and Opportunities, ref: CSD2008-00040).

### Lecturas recomendadas

- Bernal, S., Butturini, A., Nin, E., Sabater, F. And Sabater, S. 2003. Leaf litter dynamics and nitrous oxide emission in a Mediterranean riparian forest: implications for soil nitrogen dynamics. *Journal of Environmental Quality* 32(1): 191–197.
- Dahm, C.N., Cleverly, J.R., Allred Coonrod, J.E., Thibault, J.R., McDonnell, D.E. and Gilroy, D.J. 2002. Evapotranspiration at the land/water interface in a semi-arid drainage basin. *Freshwater Biology* 47: 831–843.
- Medici, C., Butturini, A., Bernal, S., Vázquez, E., Sabater, F., Vélez, J.I. and Francés, F. 2008. Modelling the nonlinear hydrological behaviour of a small Mediterranean forested catchment. *Hydrological Processes* 22(18): 3814–3828.
- Naiman, R.J., Décamps, H. and McLain, M.E. 2005. *Riparia: Ecology, Conservation and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press, London, UK. 448 p.
- Sabater, S., Butturini, A., Clement, J.C., Burt, T., Dowrick, D., Hefting, M., Maitre, V., Pinay, G., Potoloché, C., Rzepecki, M. and Sabater, F. 2003. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient: Patterns and factors of variation. *Ecosystems* 6(1): 20–30.

## Economía del agua y los bosques: cuestiones y recomendaciones políticas

**Lelia Croitoru y Mike Young**

**E**n la región mediterránea, los limitados recursos hídricos se asignan, a menudo, a usos de escaso valor, principalmente vinculados a la agricultura. ¿Por qué? La gestión eficiente del agua exige considerar tanto el suministro hídrico como su demanda. Asignar un precio adecuado al agua, mejorar las políticas de adjudicación y regulación pueden ser útiles para disminuir la demanda excesiva y promover un mejor uso. Los mecanismos para financiar a los suministradores de agua, como los ecosistemas forestales, pueden mantener o mejorar el aprovisionamiento hídrico. Este capítulo presenta brevemente algunos de los retos a los que se enfrentan los recursos hídricos en el Mediterráneo y discute cómo funcionan en la práctica algunos de estos mecanismos. Se incluyen lecciones y observaciones llevadas a cabo en Australia puesto que este país tiene un clima mediterráneo y se enfrenta a problemas similares de escasez de agua.

---

*En un contexto de escasez de recursos hídricos, las políticas predominantemente orientadas al suministro han conducido al mal uso y exceso de consumo de agua en la región mediterránea. Es posible revertir estas tendencias actuando, tanto sobre la demanda como sobre el suministro, por medio de instrumentos económicos adecuados.*

---

El agua en la región mediterránea es escasa en comparación con otras regiones del mundo. Su escasez es especialmente aguda en los países del norte de África y de Oriente Medio, en los que la disponibilidad de agua es de 1.100 m<sup>3</sup> per cápita, o sólo un 12% del promedio global. El crecimiento de la población reducirá aún más la disponibilidad hídrica a 550 m<sup>3</sup> per cápita en 2050 (sólo 9% del promedio global estimado para ese mismo año) (ver secciones 1.2 y 4.5). Es más, el cambio climático hace prever sequías e inundaciones más frecuentes y más graves. En muchas partes de la región mediterránea, se espera que el cambio climático produzca una disminución significativa en la disponibilidad de agua.

La región ha progresado de manera importante en la gestión de la escasez de agua a través de grandes inversiones de capital en presas y embalses y la expansión del suministro hídrico y de los servicios de saneamiento. Sin embargo, estas inversiones se han orientado al suministro y han conducido a la aparición de diversos problemas relacio-

nados con la gestión: los gobiernos no son capaces de controlar el uso de los acuíferos, las aguas residuales sin tratar, a menudo se abocan a los ríos cuya calidad se ve afectada, el agua de las comunidades urbanas recibe elevadas subvenciones, exacerbando la demanda y aumentando la necesidad de financiación adicional para la rehabilitación de los sistemas hidrológicos.

En muchas áreas, estos problemas han conducido al uso excesivo o al mal uso del agua, degradando aún más los suministros hídricos y amenazando el bienestar de la población. Las prácticas de riego inapropiadas pueden aumentar la salinidad del agua y reducir la productividad agrícola. El acceso inadecuado a agua limpia y saneamiento tiene como resultado enfermedades transportadas por el agua, especialmente entre los niños. La colmatación de los embalses y la sobreexplotación de las aguas profundas amenazan la futura disponibilidad hídrica tanto como agua potable como para riego<sup>1</sup>. Una serie de estudios sobre el coste de la degradación medioambiental, llevados a cabo durante la pasada década, por el Banco Mundial, estimó el coste anual asociado a la degradación hídrica, suministro inadecuado de agua, y escaso saneamiento desde un 0,6% del producto interior bruto (PIB) en Túnez hasta el 2,8% en Irán.

Hallar las medidas adecuadas para conservar y compartir el acceso a la, ya de por sí, escasa agua de la región resulta esencial. Muchos países de Oriente Medio y del Norte de África han empezado a gestionar sus recursos hídricos de un modo mucho más integrado. Esta gestión reconoce la importancia de los instrumentos económicos para complementar las soluciones técnicas y la importancia de gestionar la demanda hídrica tanto como su suministro. Por el lado de la demanda, se han aplicado, para influenciar el consumo hídrico, medidas tales como el encarecimiento del precio, procesos de asignación sólidos y el desarrollo de mercados de agua. Uno de los retos que se mantiene en este planteamiento es cómo aprovechar estas medidas para proteger los ecosistemas que aportan calidad y provisión de agua. Por ejemplo, muchos bosques y ecosistemas arbustivos juegan un papel importante en la regulación de los flujos hídricos y en la reducción del riesgo de inundación<sup>2</sup> (ver secciones 1.5, 2.1, y 2.2). Puesto que estos servicios se suelen gestionar externamente, suelen existir pocos incentivos para conservar los ecosistemas que los suministran. Los mecanismos para financiar la conservación de estos ecosistemas, como los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), pueden ayudar a mejorar el suministro de agua, como lo demuestra el éxito de su aplicación en varios países de América Latina.

---

**Poner un precio y comerciar con el agua adecuadamente puede ayudar a reducir su uso excesivo.**

---

<sup>1</sup> Utilizando datos de Jordania, Yemen, Egipto, Túnez y Marruecos se estimó que el valor del agotamiento del agua subterránea puede llegar al 2% del PIB. En Túnez, por ejemplo, el coste anual de la sobreexplotación de agua subterránea es 0,1% del PIB o un 20% del coste total de la degradación hídrica del país.

<sup>2</sup> Cada vez más publicaciones muestran que las relaciones biofísicas entre bosques y agua varían mucho de una localización a otra, dependiendo del clima, suelo y tipo de vegetación. Mientras que los bosques tienden a mejorar la calidad del agua, su impacto sobre el flujo anual total suele ser negativo. Los bosques también ayudan a reducir el riesgo de inundación de los tramos bajos, pero su papel es escaso en la reducción de las inundaciones más destructivas, que ocurren una vez en la vida.

### Cuadro 29. El desarrollo de mercados de agua en la cuenca Murray Darling, Australia

En la cuenca Murray Darling se concedieron permisos para extraer agua de riego proporcionales a la superficie regable. Entre 1960 y 1980 el sistema cambió a un régimen en el que se medía el consumo y los regantes pagaban en proporción al volumen de agua utilizada. En algunos sistemas también se distinguió entre el agua necesaria para mantener los árboles perennes y las viñas y la que se usaba para cultivar herbáceas o cultivos anuales. Todos los interesados entendieron que la prioridad de la asignación debía de ser para el riego de cultivos perennes. Al mismo tiempo, el área máxima que podía ser regada se redefinió como un volumen hídrico máximo que se podía utilizar.

A finales de la década de 1980 quedaba claro que los recursos hídricos de la cuenca se habían utilizado en exceso. Como resultado, en 1993 se instituyó un límite en la cantidad de agua que se podía utilizar. Rápidamente, y animados por la emergente política de competencia nacional, —que, entre otras cosas, requería el desarrollo de mercados de agua para que ésta se pudiese trasladar a lugares donde se usaría con más provecho— emergió un mercado de asignaciones y derechos del agua. Hoy, la mayoría de los regantes de la cuenca compran y venden agua entre ellos con regularidad.

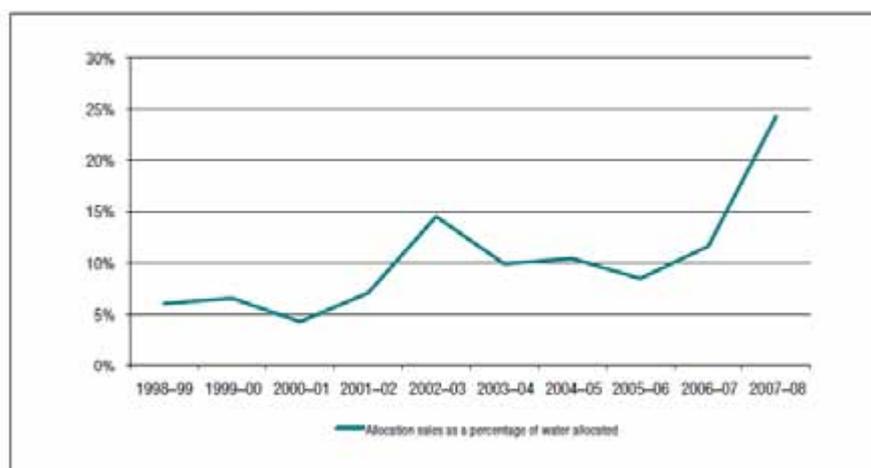
Se establecieron registros formales de derechos sobre el agua y se redefinió el volumen máximo que se podía utilizar como el derecho a una fracción del agua que se asignara al consumo, más que una cantidad absoluta. Se establecieron mercados y sistemas de contabilidad para que los regantes pudieran decidir la venta de sus derechos y/o asignaciones en el caso en que esta opción les resultara más provechosa. A medida que se fueron desarrollando los mercados, los derechos de asignación y el control del uso, se separaron formalmente. Hoy, los derechos se pueden transferir de la cuenta hídrica de un titular a otro por internet en un proceso parecido al usado para traspasar dinero de una cuenta bancaria a otra o para comprar acciones a través de internet. Mecanismos similares se usan para facilitar el comercio de derechos.

El uso del suelo, el desarrollo y la aprobación de trabajos se expiden por separado y resulta posible obtener estas aprobaciones sin tener derecho de asignación. Se vigila estrictamente el cumplimiento del sistema de contabilidad. El intento de fraude a través de los sistemas de medida tienen como resultado la persecución legal y penas tan duras que la compra de una asignación en el mercado, resulta más barata que el pago una multa por exceso de uso.

El resultado ha sido la expansión de la innovación y la inversión asociados a un nuevo conjunto de problemas con las asignaciones causados por el fallo en la puesta a punto de procedimientos robustos de regulación de las asignaciones. Para resolver estos problemas, los gobiernos han acordado colectivamente el nombramiento de un grupo independiente de expertos que deben preparar un nuevo plan para la cuenca del Murray-Darling de manera que las asignaciones se puedan mantener dentro de límites sostenibles. Bajo el nuevo sistema, el papel del gobierno es definir límites absolutos sobre la cantidad de agua que se puede extraer de un río y el mercado para determinar dónde se usa esta agua. El agua se asigna a los interesados de acuerdo a la proporción que les corresponde. Los interesados son libres para determinar si usan, venden o dejan esta agua almacenada para usarla al año siguiente. Fuente: Young 2010.

Por el lado de la demanda resulta necesario distinguir claramente entre establecer el precio que refleje el coste del servicio y el precio que refleje la escasez<sup>3</sup>. Como regla general, los gobiernos son reacios a usar el precio como medio de gestionar la escasez. Una explicación puede ser que a los políticos no les gusta subir los precios en tiempos

<sup>3</sup> En la mayoría de sistemas de asignación de recursos se puede lograr eficiencia imponiendo los costes marginales. Cuando los suministros de agua son abundantes y se suministran a través de un único sistema de distribución, el coste marginal es menor que el coste medio y tiende a disminuir cuando aumenta el consumo. Como resultado, y si la empresa de suministro hídrico desea recuperar sus costes de mantenimiento y operatividad, el precio del suministro debe ser calculado al coste medio. Cuando los suministros de agua son escasos el coste marginal del suministro suele subir cuanto más agua se consume. Así, una guía general para poner precio con eficiencia consiste en cobrar el precio más alto entre los costes medio y marginal.



**Figura 72.** Porcentaje de asignaciones de agua vendidas a otros consumidores hídricos en el Southern Connected River Murray System, Australia. Fuente: NWC 2010.

de penurias económicas como puede ser una sequía. En Australia, sin embargo, y en España en menor medida, los gobiernos han permitido el desarrollo de los mercados hídricos como medio de asignar precios que reflejen la escasez y faciliten el ajuste. La principal ventaja de este enfoque basado en el mercado consiste en que los consumidores de agua negocian el precio a pagar sin necesidad de involucrar a una agencia gubernamental. Típicamente, quienes venden el agua lo hacen a un precio más elevado que el valor que tiene para ellos. Los que la compran pagan un precio que es menor que el valor que supone para ellos. Como resultado, tanto el comprador como el vendedor salen ganando y el resto de los consumidores de agua no resultan afectados por la transacción. Esta situación es muy distinta de aquella en la que un gobierno adjudica un precio de escasez, lo cobra y luego debe decidir qué hacer con las ganancias.

En Australia, el rápido crecimiento del comercio hídrico, en la cuenca conectada con el sistema del río Murray, por ejemplo, se ha visto potenciado con el establecimiento de registros y títulos de derechos y el derecho a la segregación de los derechos sobre el agua en participaciones, asignaciones, aprobación de usos y de trabajos (ver Cuadro 29 y Figura 72).

El uso de los sistemas de derecho al agua y de asignación como medio de enviar señales de escasez y revelar los costes de oportunidad ha demostrado ser extremadamente efectivo en el sector de regadío, y han supuesto importantes mejoras en la eficiencia y la innovación, como el reemplazo del riego por inundación por sistemas de goteo completamente automatizados, y el desarrollo de sistemas de control de los canales. Resulta significativo que el comercio del agua ha reducido drásticamente el impacto adverso de la sequía sobre las economías y negocios regionales. El gobierno centra ahora su atención en el desarrollo de acuerdos institucionales que amplíen el mercado para incluir el impacto del consumo de agua no medido, como aumentos de plantaciones forestales, construcción de diques en campos de cultivo y la captura de flujos no regulados. También se intenta que el aumento de la eficiencia del consumo hídrico tienda a reducir el flujo y sirva para tratar los problemas de sobreasignación. Se está preparando un nuevo plan de asignación para la cuenca del Murray-Darling. Entre otras cosas, se está diseñando considerando la conectividad entre los recursos hídricos de superficie y subterráneos y el cambio climático.

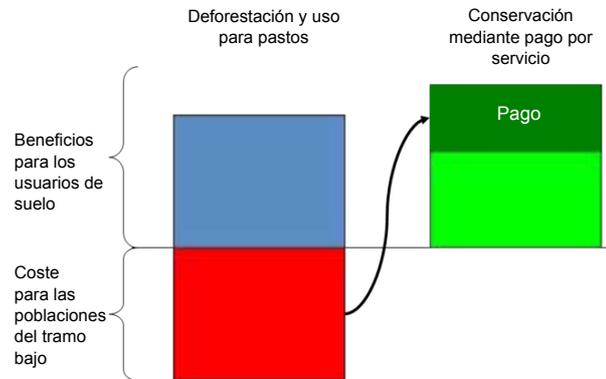


Figura 73. Pago por servicios ambientales.

Una de las implicaciones de este enfoque más sólido de la contabilidad del agua es el siguiente: cualquier impacto de la silvicultura sobre el suministro de agua debe ser compensado. Cualquier persona que quiera establecer una nueva plantación debe primero adquirir un derecho sobre el agua de suficiente magnitud como para compensar los efectos de dicha plantación sobre los restantes usuarios del agua. Para ello existe una variedad de opciones que van desde la simple compra de un derecho sobre el agua equivalente al impacto esperado, de la plantación a largo plazo sobre los otros usuarios, hasta la compensación anual de los impactos.

Desde la perspectiva de los países mediterráneos la lección más importante que se puede extraer de la experiencia australiana es que las reformas requieren tiempo y que la secuencia debe ser cuidadosamente supervisada. El desarrollo de un mercado de adjudicación de agua estacional, por ejemplo, dependió críticamente de que se hubiesen introducido con anterioridad contadores de agua y del desarrollo de una cultura que asegurase que los regantes sólo consumirían la cantidad de agua que se les había adjudicado.

---

**Mejorar la conservación de los ecosistemas forestales como proveedores de agua resulta posible mediante el pago, por parte de los consumidores de agua limpia del tramo bajo a los consumidores de la cabecera, lo que puede permitir internalizar lo que de otra manera sería una externalidad.**

---

Aunque los sistemas de poner precio al agua y de asignación diferenciada ayudan a reducir la demanda hídrica y su uso excesivo, no contribuyen a conservar los ecosistemas que proveen los servicios hídricos. Se deberían idear otros mecanismos para dar soporte a la conservación de los ecosistemas como los bosques y zonas arbustivas. Estos mecanismos incluyen Pagos por los Servicios Ambientales (PSA), esquemas de comercio y otros. Esta sección se concentra básicamente en el PSA ya que se ha implementado con éxito en muchos países.

El PSA se basa en los principios gemelos de que quienes se benefician de los servicios ambientales (como los consumidores de agua limpia) deberían pagar por ellos, y que quienes contribuyen a generar estos servicios (como los gestores del suelo de la cabecera, deberían ser compensados por proveerlos, tal y como se ilustra en la Figura 73. El enfoque busca crear mecanismos para inducir transacciones entre los consumi-

res de agua y los proveedores del servicio que vayan en interés de ambas partes para así internalizar lo que de otro modo sería externalizado. El planteamiento del PSA resulta atractivo dado que: I) genera nuevas fuentes de financiación, que de otro modo no estarían disponibles para la conservación, II) es muy probable que resulte sostenible, puesto que depende del interés mutuo de consumidores y proveedores y no de los caprichos del gobierno o de las donaciones<sup>4</sup> y III) es muy probable que resulte eficiente, puesto que conserva los servicios cuyos beneficios exceden el coste de generarlos y no los conserva en el caso contrario.

Se pueden identificar dos tipos de programa PSA. El caso ideal es el de los programas **financiados por los consumidores**, en los que los pagos a los proveedores dependen de los pagos realizados por los consumidores. Estos programas PSA tienen más posibilidades de ser eficientes puesto que los consumidores del servicio proporcionan, no sólo financiación, sino también información sobre qué servicios son más valiosos, y tienen un gran incentivo para asegurar que los pagos se usan con efectividad. A la inversa, los programas PSA **financiados por el gobierno** dependen de la financiación de un tercero, normalmente el gobierno nacional, y, puesto que suelen cubrir áreas mayores, tienden a ser menos eficientes.

La mayoría de los ejemplos de aplicación del PSA con resultados favorables proceden de Latinoamérica. Los programas PSA financiados por los consumidores incluyen sistemas de suministro de agua doméstica, variando en tamaño desde el de Quito en Ecuador, a pueblos de tamaño medio como Heredia en Costa Rica, a muchos pueblos pequeños como San Francisco de Menéndez, El Salvador y Jesús de Otoro en Honduras; productores de energía hidroeléctrica públicos y privados; y sistemas de riego. Todos los programas pretenden proteger las cuencas específicas de las que los consumidores obtienen el agua. Se han establecido programas financiados por el gobierno nacional en Costa Rica, Méjico y Ecuador y se están planeando en varios estados de Brasil. Estos programas también han tendido a enfocarse básicamente sobre servicios hídricos.

Tanto si son financiados por los consumidores, como si lo son por el gobierno, los programas PSA ofrecen el potencial de promover usos del suelo mucho más sostenibles, que preservan los suministros hídricos al permitir pagos a largo plazo por parte de los usuarios que adopten estas prácticas. La condicionalidad de los pagos, que es uno de los rasgos principales de los programas PSA también ofrece más control sobre los resultados. En el pasado, los proyectos de gestión de las cuencas han tenido tendencia a ofrecer soporte sólo a corto plazo, y su impacto sobre el uso del suelo a menudo ha cesado una vez acabado el proyecto. Un estudio en una cuenca tunecina mostró que implementar un programa PSA financiado por el gobierno en lugar del sistema subsidiario actual podría tener como resultado la adopción de usos del suelo más sostenibles en áreas de alto riesgo de erosión. Los principales retos al implementar los programas PSA son: I) lograr una comprensión clara del modo cómo los usos del suelo afectan a los servicios del tramo bajo de la cuenca, y II) desarrollar las estructuras institucionales apropiadas que sean capaces de gestionar el PSA con efectividad durante largos períodos de tiempo.

<sup>4</sup> Esto es aplicable a los programas financiados por los consumidores, como ya se ha definido. En este caso no hay fondos externos y no hay razón para esperar que el interés del comprador se agote puesto que reciben beneficios concretos a cambio de sus pagos. En Costa Rica, por ejemplo, los consumidores que han venido pagando por la conservación han renovado sus acuerdos al expirar los acuerdos iniciales.

Los nuevos enfoques prometen mejorar significativamente el consumo de agua ayudando a gestionar mejor la demanda y protegiendo los suministros. A pesar de que estos enfoques deben ser adaptados a las condiciones particulares, existen ejemplos, funcionando en todo el mundo, que pueden servir de guía. Un aspecto favorable de los problemas hídricos es que tienden a ser específicos de la cuenca. Así, se pueden experimentar nuevos enfoques en cuencas individuales y no resulta necesario adoptarlos en todo el país desde un principio. Los procesos pueden, también, avanzar a diferentes velocidades en diferentes cuencas, dependiendo de las necesidades y capacidades locales.

### Agradecimientos

Agradecemos especialmente a Stefano Pagiola sus constructivos comentarios sobre este capítulo.

### Lecturas recomendadas

- Croitoru, L. and Sarraf, M. (eds.) 2010. *The Cost of Environmental Degradation: Case Studies from the Middle East and North Africa*. Directions in Development. The World Bank. Washington D.C. 168 p.
- National Water Commission. 2010. *The impacts of water trading in the southern Murray–Darling Basin: An economic, social and environmental assessment*. National Water Commission, Canberra, Australia.
- Pagiola, S. and Platais, G. 2007. *Payments for Environmental Services: From Theory to Practice*. Washington: World Bank.
- Pagiola, S., Zhang, W. and Colom, A. 2010. Can payments for watershed services help finance biodiversity conservation? A spatial analysis of highland Guatemala. *Journal of Natural Resources Policy Research* 2(1): 7–24.
- Young, M.D. and McColl, J.C. 2008. Double trouble: the importance of accounting for and defining water entitlements consistent with hydrological realities. *The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 53: 19–35.
- Young, M.D. 2010. *Environmental Effectiveness and Economic Efficiency of Water Use in Agriculture: The Experience of and Lessons from the Australian Water Reform Programme*. Background report prepared for OECD study. Sustainable Management of Water Resources in Agriculture. Available at [www.oecd.org/water](http://www.oecd.org/water).



**Figura 74.** El peso del corazón (1300 años antes de Cristo) Fuente: Eternal Egypt: Masterworks of Ancient Art from the British Museum por Edna R. Russmann.

## Agua para los Bosques y la Sociedad en el Mediterráneo: un difícil equilibrio

### Recopilación de los mensajes clave

## Capítulo 1. Puntos básicos

### 1.1. Una visión general del ciclo hidrológico: Agua verde y agua azul

A escala global, y desde los orígenes de nuestro planeta, una misma masa de agua fluye continuamente siguiendo las rutas que conforman los procesos del ciclo hidrológico. Este ciclo conecta la biosfera con la atmósfera y los ecosistemas, incluyendo los antroposistemas.

La gestión de los recursos hídricos a diferentes escalas geográficas debe basarse en el análisis del balance hídrico. Constituye un método contable que requiere evaluar multitud de datos hidrológicos relacionados con las reservas y los flujos de agua (entradas y salidas).

El enfoque del agua verde ha despertado gran interés en los últimos años, especialmente en regiones secas donde el agua verde domina el ciclo hidrológico. Sin embargo,

resulta claro que el concepto tiene sus límites al tratar de estructurar la información sobre la gestión y la planificación de los recursos hídricos.

### 1.2. Los recursos hídricos y forestales y la población del Mediterráneo: situación actual

El crecimiento demográfico es importante tanto en el Sur como en el Este, especialmente en áreas urbanas y costeras cuyo crecimiento anual es de 4,1 millones de habitantes y soportan un flujo anual de 175 millones de turistas.

La irregularidad, tanto espacial como temporal, de las precipitaciones obliga a mantener una capacidad de reserva de agua que representa una elevada proporción del agua superficial. (En Siria representa más del 90 por ciento del agua superficial, en Marruecos y Túnez supone más del 80 por ciento).

En 2005, casi 180 millones de habitantes del Mediterráneo padecían déficit de agua y 60 millones se enfrentaban a situaciones de escasez.

La demanda de agua aumenta drásticamente en el sur y en el este y se satisface cada vez más a través de una producción insostenible.

Las políticas hidrológicas están todavía demasiado enfocadas en el suministro, lo que induce riesgos a largo plazo.

A pesar de algunos rasgos comunes, la dinámica de los bosques y montes muestran variaciones regionales. En ambas riberas los bosques están a menudo situados en áreas montañosas, actuando como "depósitos de agua" y principales refugios de biodiversidad, por lo que las interacciones entre bosques y agua que tienen lugar en las partes altas de las cuencas resultan cruciales.

Las demandas de la sociedad hacia los bosques han evolucionado hacia una multifuncionalidad creciente que va desde la producción de madera hasta el uso social y la preocupación medioambiental.

El futuro de los bosques del Mediterráneo está amenazado por el riesgo, cada vez mayor, de incendios devastadores inducidos por la sequía.

Los suelos mediterráneos están sujetos a procesos de desertificación lentos, pero inevitables como consecuencia de la degradación del suelo debida a una gestión inadecuada de los regadíos, especialmente al sur y al este del Mediterráneo.

Resulta necesario poner en marcha políticas más enérgicas y prácticas de gestión sostenible de los recursos hidrológicos, forestales y de preservación del suelo.

### 1.3. Las áreas forestales ¿influyen sobre el régimen de lluvias?

La deforestación tropical a gran escala tiene efectos sobre la lluvia y puede hacer que el clima sea más cálido y más seco.

Los bosques nubosos de montaña capturan el agua del aire o de las nubes arrastradas por la convektividad.

La acumulación de evidencias, tanto por medio de la observación como de estudios con modelos, sugiere que los bosques tienen un efecto sobre el microclima local, a través de los cambios en el albedo, la superficie foliar, la rugosidad del dosel y la evapotranspiración.

Recientes hallazgos, conocidos como la teoría de la “bomba biótica” activa, sugieren que en áreas con cubierta boscosa natural extensa y continua, la humedad atmosférica se transporta tierra adentro desde el océano a los bosques.

Deberíamos mejorar nuestras debilidades e incertidumbres a la hora de entender y modelizar las respuestas climáticas, incluyendo los patrones de precipitación y los cambios de la cubierta del suelo.

#### 1.4. Flujos hídricos en los bosques

Los flujos hídricos que entran y salen de los bosques se pueden observar a diferentes escalas, tanto espaciales como temporales. A nivel de la cuenca, la escala espacial primaria de entradas y salidas de agua suele ser fácil de identificar y se ajusta a una ecuación muy sencilla de balance de masa de agua.

La precipitación es, normalmente, el único flujo de entrada a la cuenca. En los climas de tipo mediterráneo la precipitación muestra una alta variabilidad interanual y una fuerte estacionalidad con episodios de alta intensidad en la estación lluviosa.

La transpiración de los bosques mediterráneos puede suponer hasta un 75% de la evapotranspiración total de los mismos, mientras que las pérdidas por interceptación alcanzan un 25%.

A pesar de tratarse de un componente menor del balance hídrico anual de las cuencas mediterráneas, las salidas por los cursos de agua (agua azul) juegan un papel primordial en el suministro de agua río abajo a las poblaciones urbanas, a la industria y a la agricultura.

El tipo de vegetación y su densidad pueden afectar tanto a la cantidad como a la distribución del caudal de salida de la cuenca dado su efecto sobre la evapotranspiración y la infiltración en la superficie del suelo. La manipulación de la vegetación en las cuencas mediterráneas puede así, jugar un papel muy importante para conseguir el equilibrio óptimo entre los diversos flujos hídricos. Para lograrlo resulta necesario considerar cuidadosamente objetivos múltiples, dado que están presentes tanto conflictos como compromisos entre ventajas y desventajas.

#### 1.5. El papel del bosque mediterráneo en la conservación del suelo y del agua

Los suelos mediterráneos son un componente muy frágil de los ecosistemas terrestres. Son susceptibles a la erosión al estar expuestos a fuertes e intensas lluvias, seguidas de intensa escorrentía que se aceleran debido a la topografía montañosa. Por lo tanto, agua y el suelo se deben considerar conjuntamente.

La energía liberada cuando una gota de lluvia impacta sobre el suelo puede ser controlada por la vegetación, con una cobertura de entre un 20% a un 30%, con apenas diferencias entre plantas, arbustos y árboles.

Los suelos forestales presentan una ventaja comparativa frente a otros tipos de suelo en lo que a porosidad y conductividad hidráulica se refiere, y resultan menos susceptibles a los efectos mecánicos de las gotas de lluvia.

La escorrentía depende del estado de la superficie del suelo, del contenido inicial de

agua en el mismo y, por supuesto, de la intensidad de la lluvia. La cubierta forestal retrasa su inicio e impide, o reduce, el establecimiento de escorrentía intensa.

Las pérdidas del suelo como sedimento en las aguas de escorrentía y su dinámica durante los episodios de lluvia dependen, entre otros factores, del estado de la superficie del suelo. Bajo la cubierta forestal, comparado con otro tipo de cubierta vegetal, la limitación de la erosión va unida al retraso en el inicio de la escorrentía y al hecho de que se dificulta el establecimiento de un régimen intenso de escorrentía, como ya se ha mencionado.

El papel de la cubierta forestal en la conservación del agua y del suelo en el Mediterráneo resulta bastante diferente de los clichés que con demasiada frecuencia se sugieren y aceptan, considerando que los bosques suponen una protección total contra los procesos de erosión.

Resulta necesario avanzar en la investigación para desarrollar un cuerpo de conocimientos sobre la conservación de agua y suelo en las condiciones de los bosques mediterráneos. Un programa de investigación concertado alrededor de la cuenca mediterránea podría ofrecer perspectivas interesantes.

## Capítulo 2. El agua azul

### 2.1. Hidrología de los ecosistemas mediterráneos

La mayoría de los recursos hidrológicos del Mediterráneo se generan en las montañas húmedas, mientras que las áreas costeras y tierras bajas son consumidoras de agua.

Los hidrólogos suelen dividir los flujos de agua en flujos de tormenta y flujos de base. Los primeros son la respuesta rápida a un episodio de precipitación dado, mientras que los segundos se deben a la descarga diferida de almacenes subterráneos, normalmente tras una fluctuación estacional.

Los principales procesos de generación de recursos de agua en el Mediterráneo están relacionados con la percolación a niveles profundos, una vez alcanzada la capacidad de retención de agua del suelo (como en los climas más húmedos) pero también, como suele ocurrir en climas más secos, con el hecho de que la precipitación exceda la tasa de infiltración en los horizontes superficiales del suelo, lo que da como resultado escorrentías que causan erosión y riesgo de inundaciones.

Las características de la cubierta y de la superficie del suelo juegan un papel importante y a la vez complejo en los procesos hidrológicos y erosivos.

La conservación de la calidad ecológica de los cursos de agua mediterráneos pasa por la protección del régimen del flujo, la calidad del agua, la morfología del lecho, los bosques de ribera y el transporte de sedimento.

## 2.2. Los recursos hidrológicos dependen de la cubierta vegetal y del uso del suelo

La cubierta vegetal y su gestión pueden tener un profundo impacto en el reparto del agua y la energía.

La cubierta y el suelo forestal resultan, en general, beneficiosos para la calidad de las aguas superficiales y subterráneas generadas en la cuenca hidrológica.

Mitos sobre la silvicultura y el agua:

- a) Los efectos beneficiosos de los bosques se han exagerado a menudo por parte de los conservacionistas, con el deseo de proteger las áreas naturales, y por los silvicultores comerciales que deseaban justificar nuevas plantaciones.
- b) Los bosques pueden aumentar, en ocasiones, los flujos de la estación seca, pero en general son más proclives a reducirlos.
- c) La capacidad de los bosques para moderar las inundaciones es mucho más débil de lo que se suele argumentar ya que se restringe a tormentas de poca magnitud y a cuencas de tamaño limitado.

## Capítulo 3. Agua verde

### 3.1. El agua verde para mantener los procesos de los ecosistemas forestales y sus funciones

El agua verde es necesaria no sólo para sustentar la biología y la vida de los árboles, sino para mantener funcionales todos los grupos que forman la biodiversidad del bosque (microorganismos, insectos, animales, plantas) y participan en los procesos básicos de los ecosistemas. A pesar de que la fisiología de la fotosíntesis consume poca agua, las plantas terrestres necesitan transpirar grandes cantidades para transportar los nutrientes hasta las copas y para el intercambio gaseoso. El agua es también esencial para la circulación de elementos químicos a través del ecosistema.

Observar los procesos que tienen lugar en los ecosistemas naturales –que dependen en gran medida del agua– ayuda a entender sus efectos sobre las funciones de los ecosistemas y, a su vez, los servicios relacionados con los mismos. Puesto que el agua es, muy a menudo, un factor limitante en los ecosistemas forestales del Mediterráneo, la escasez de agua puede dar como resultado una marcada alteración de las funciones del ecosistema y tener un impacto negativo en la provisión de bienes y servicios para las sociedades humanas.

El agua verde resulta necesaria para mantener el funcionamiento de los ecosistemas, sus funciones y los bienes y servicios que proporcionan.

### 3.2. Los procesos del agua en los árboles: transpiración y fotosíntesis

La gran cantidad de agua transpirada para fijar el carbono es significativa. En el caso del *Quercus ilex*, son normales valores de 3–5 (mmoles CO<sub>2</sub>/mol de H<sub>2</sub>O). Una vez descon-

tado el carbono que retorna a la atmósfera por la respiración, fijar un gramo de carbono puede tener un coste de 1.000 a 1.500 gramos de agua.

En el Mediterráneo la mayoría de los bosques tienen limitaciones de agua en períodos estivales y de energía en los períodos invernales.

Las proteínas denominadas acuaporinas facilitan el movimiento del agua a través de las membranas celulares. Estas proteínas pertenecen a la principal familia de proteínas intrínsecas, cuyos miembros se encuentran en la mayoría de los organismos vivos.

La respuesta más rápida de las plantas para controlar la pérdida de agua consiste en cerrar los estomas, lo que reduce su conductancia al agua, pero al mismo tiempo reduce la fijación de carbono.

### 3.3. Cómo combaten el estrés hídrico las plantas

Las plantas han desarrollado varias estrategias, a diferentes escalas temporales, para sobrellevar la reducción de disponibilidad de agua del suelo: ajustes fenológicos, control del estado hídrico, características morfológicas y anatómicas que pueden variar entre y dentro de cada especie.

En condiciones de estrés hídrico pronunciado, se puede producir un embolismo en los vasos conductores – impidiendo que la savia ascienda del suelo a las hojas – que puede acabar en la desecación y muerte de la rama o del árbol. Los umbrales de presión crítica del xilema relacionados con el embolismo varían muchísimo entre especies, estando las mediterráneas entre las más resistentes a la sequía.

La alta resistencia a la sequía de las especies de árboles mediterráneos tiene un coste en forma de alta densidad de la madera y ritmos de crecimiento lentos.

Los rasgos adaptativos a la sequía aumentan la posibilidad de supervivencia en condiciones de déficit de agua en el suelo. Sus variaciones entre y dentro de las especies (entre poblaciones) permiten la selección de semillas más indicadas para llevar a cabo las plantaciones.

La diversidad entre diferentes especies de plantas mediterráneas se muestra en su capacidad para acumular biomasa a través de la fotosíntesis para una cantidad de agua determinada, es decir la eficiencia en el uso del agua (EUA), lo que abre caminos para aplicaciones potenciales en silvicultura.

## Capítulo 4. Agua azul y/o agua verde: ¿dónde está el compromiso?

### 4.1. Garantizar el agua para los árboles y para las personas: posibles escenarios.

En condiciones mediterráneas, la reducción del LAI (p.ej. por claras) no reduce la transpiración total, pues los árboles que quedan en pie utilizan el agua no transpirada por

los árboles cortados. Sin embargo, una consecuencia es que aumenta la supervivencia de los árboles.

Mantener los árboles vivos, incluso sin aumento de la biomasa, se traduce en un ingente coste de agua, en particular en las especies perennes tan comunes en el Mediterráneo.

En el entorno mediterráneo, restringido por limitaciones hidrológicas, sólo los cambios drásticos en la cubierta forestal, más allá de los límites de las clásicas claras, pueden dar, como resultado, un aumento del agua azul.

El cambio drástico de la cubierta forestal para incrementar la producción de agua azul en el tramo bajo de la cuenca merece especial atención y debería integrar todos los bienes y servicios relacionados con la cubierta inicial.

Los usuarios de la cabecera fluvial se pueden beneficiar de las plantaciones forestales, mientras que los del tramo bajo se verían afectados por los efectos del cambio en la gestión del suelo en la cantidad y la calidad del agua que llega a las reservas.

Las inversiones en plantaciones forestales producen menos ganancias directas comparadas con el escenario habitual (*business as usual*) pero podrían generar beneficios mayores para la sociedad si se incluyeran externalidades a escala local- y nacional- como el aumento de la fertilidad del suelo y de la capacidad de agua, y externalidades a escala global como la protección de la biodiversidad y el secuestro de carbono.

#### 4.2. Agua para los ecosistemas, los bienes y servicios y para las personas

Tanto el agua como los bienes y servicios de los ecosistemas resultan fundamentales para nuestra existencia.

Agua azul y agua verde son necesarias para posibilitar el funcionamiento de los ecosistemas y para mantener la producción de bienes y servicios que todos necesitamos.

La mayor parte del agua de lluvia se distribuye naturalmente y se invierte en la producción de los bienes y servicios que nos proporcionan los ecosistemas.

Una reducción drástica del área forestal podría aumentar la disponibilidad de agua, pero influenciaría negativamente la provisión de bienes y servicios de los ecosistemas.

#### 4.3. Gestión integrada del agua a escala del paisaje: la ciencia como base del desarrollo – Un caso de estudio en Túnez

El conocimiento basado en los cálculos de la reserva hídrica útil del suelo (RU) permite:

- I) simular una variedad de resultados según la lluvia anual,
- II) comparar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo de las cuencas con la de las instalaciones que retienen el agua (presas),
- III) simular las necesidades de irrigación en relación con diversas cubiertas forestales,
- IV) proporciona herramientas para lograr el equilibrio entre agua azul y verde.

Los efectos del cambio en la cubierta forestal, incluyendo el bosque, y de las técnicas de conservación de suelo y agua se pueden predecir en base a los cálculos de la erosión laminar y abarrancamiento y del uso de técnicas de simulación.

#### 4.4. Hacia una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica integrada

El paradigma del agua azul se basa en la evaluación de los efectos de los bosques y otros usos del suelo y de la gestión, sobre la disponibilidad de recursos de agua azul para uso humano; esta evaluación se puede llevar a cabo tanto con modelos hidrológicos como con indicadores relevantes de las políticas aplicadas.

El paradigma del agua verde – además del paradigma del agua azul – debería ser objeto de mayor atención puesto que los flujos de agua verde preservan las principales funciones de los ecosistemas.

El desafío de integrar los intereses de la cabecera y del tramo bajo, incluyendo ecosistemas terrestres y acuáticos, se puede afrontar reconciliando los paradigmas de agua azul y verde. En la práctica se puede lograr mediante el uso de modelos específicos como el indicador acuático-terrestre del impacto sobre el agua.

La integración del agua con otros servicios ecosistémicos se debería basar en una mayor comprensión de cómo interactúan los servicios entre sí.

Con respecto a la integración del agua con otros servicios de los ecosistemas, existen nuevas herramientas para analizar los compromisos y la optimización de la gestión del suelo.

Integrar una gestión ecológica, socioeconómica e hidrológica es un enfoque clave hacia la sostenibilidad.

#### 4.5. La huella del agua en nuestra vida diaria: ¿Cuánta agua utilizamos?

El agua que utilizan las personas y la naturaleza tiene que ser gestionada de acuerdo con un enfoque que atienda a las múltiples necesidades de los antropoeosistemas. El análisis de la huella hídrica permite determinar, suministrar e identificar los impactos, y proporciona claras indicaciones sobre los riesgos y las responsabilidades.

Valorar la huella hídrica, de las materias primas, las actividades sectoriales o las cadenas de producción, abre nuevas perspectivas sobre los aspectos hídricos a diversas escalas (local, regional, nacional y global) y abre el camino a muchas aplicaciones relativas a la economía, comercio, medioambiente, políticas, e industria etc.

A la agricultura le corresponde la mayor huella hídrica. A escala mundial, la producción de alimento requiere, en promedio, 70 veces más agua que la que se necesita para el mantenimiento políticas, (50 l/persona/día). Para producir una dieta de 3.000 kcal/persona/día (incluyendo un 20% de proteínas animales), resultan necesarios unos 3.500 litros de agua frente a los 50 l/persona/día para el mantenimiento de un hogar.

Plantar árboles en el Mediterráneo para el secuestro de carbono resulta altamente cuestionable a causa de su elevado coste hídrico.

Huella hídrica: un concepto interesante y una herramienta que debería combinarse con otros enfoques.

#### 4.6. Lecciones extraídas del pasado: perspectiva histórica de la hidrología forestal y la conservación del suelo al norte y al sur de la cuenca mediterránea

Los programas de gestión de cuencas, que surgieron como respuesta a importantes catástrofes hidrológicas, se basaron en ingeniería civil y biológica y se han implementado en Europa desde la segunda mitad del siglo XIX; han tenido un gran éxito a pesar del limitado conocimiento en hidrología forestal y la insuficiente consideración de los factores sociales. Actualmente, el reto consiste en mantener las funciones protectoras a través de la renovación de las áreas plantadas y su equipamiento en contextos socioeconómicos totalmente diferentes.

Los ambiciosos programas de conservación de suelo y agua llevados a cabo en el sur del Mediterráneo, con un enfoque más integrado orientado al pastoreo, la agricultura y la silvicultura conjuntamente, han producido resultados muy diferentes que, de alguna manera, quedan muy por debajo de las expectativas. Esto se debe al insuficiente conocimiento científico y a un planteamiento demasiado vertical (de arriba a abajo).

Se debería reconsiderar la puesta al día y el ajuste de las políticas de conservación de agua y suelo en relación a bosques y árboles en el contexto actual. Esta renovación se debería emprender lo antes posible sin esperar a que ocurran nuevas catástrofes, usando los conocimientos más modernos e integrando todos los aspectos relacionados con el desarrollo sostenible.

## Capítulo 5. Retos clave

### 5.1. Implicaciones del cambio climático sobre los bosques y la hidrología: una visión general

La cuenca mediterránea es una región climatológicamente compleja con una amplia abanico de subtipos climáticos y, como consecuencia, de entornos ecológicos de grandes contrastes.

La cuenca mediterránea lleva sufriendo, desde los años 70, un proceso de calentamiento parecido al que ha experimentado el planeta, aunque presenta un ritmo de calentamiento más alto que el global. Los modelos climáticos coinciden en un aumento evidente y generalizado de la temperatura a lo largo del siglo XXI.

Existe incertidumbre sobre la evolución futura del patrón de la lluvia en la cuenca mediterránea, pero es muy probable que disminuyan las precipitaciones totales y que muestren una variabilidad temporal mayor que en el presente.

Para la mitad fría del año, las predicciones de la precipitación de los modelos climáticos, muestran un cinturón al norte del Mediterráneo con incrementos, y un cinturón al sur con descensos. En verano, sin embargo, los modelos predicen un descenso generalizado de las precipitaciones.

El aumento de temperatura incrementará la demanda evapotranspirativa e, incluso sin descenso de las precipitaciones, habrá menos humedad en el suelo, más estrés hídrico

en la vegetación y un descenso de los recursos hídricos generados en las áreas lluviosas.

La cuenca mediterránea experimentará, muy probablemente, una mayor frecuencia e intensidad de sequías y olas de calor que provocarán un aumento de los incendios forestales. Las lluvias torrenciales también podrían aumentar aunque esta proyección está sujeta a un elevado nivel de incertidumbre.

La superficie forestal puede experimentar cambios importantes debido al cambio global que, también puede condicionar la futura disponibilidad de recursos hídricos.

## 5.2. Afrontar el aumento de población y el cambio de uso del suelo

El elevado crecimiento demográfico del sur y el este aumentará enormemente las necesidades de alimento, agua, suelo y energía e incrementará la presión sobre los recursos naturales. Los riesgos naturales y sociales serán más elevados en las costas mediterráneas cuya calidad e integridad están amenazadas.

Los cambios en el uso del suelo afectarán a la dinámica espacial y causarán degradaciones medioambientales.

De continuar los cambios actuales en las áreas rurales, agrícolas, de pastoreo y forestales se agravarán diversos riesgos principales derivados de la insostenibilidad:

- desertificación y pobreza rural en los SEMCs
- impactos directos e indirectos: presión acumulada en las ciudades, incremento de la emigración rural, colmatación de embalses y pérdida de biodiversidad
- pérdida del suelo agrícola de calidad debido a la expansión urbana y de infraestructuras (estimadas en más de 1,5 millones de hectáreas para 2025)
- degradación de los recursos hídricos y aumento de la vulnerabilidad a los incendios e inundaciones

El aumento en la demanda de agua, ya sea para agricultura, industria o uso doméstico, está agravando la presión sobre el recurso

Las nuevas políticas ofrecen opciones para el progreso a través de una demanda hídrica mejorada y una gestión del suministro.

La gestión sostenible de los recursos hídricos y su demanda deben basarse, por encima de todo, en un enfoque integrado a nivel de cuenca, y en el principio de solidaridad entre la cabecera y el tramo bajo, entre el interior y las zonas costeras.

Las políticas deberían de tener en cuenta la riqueza del patrimonio de las áreas rurales mediterráneas y la diversidad de sus funciones como elementos principales y oportunidades para el futuro y adaptarlos al cambio. La gestión sostenible de estas áreas debería considerar sus múltiples funciones y orientarse hacia la prevención de los riesgos naturales como los incendios forestales y las inundaciones.

Los enfoques territoriales son especialmente necesarios para asegurar la gestión sostenible de los recursos naturales, incluidos los bosques.

La gestión sostenible de los recursos hídricos, y su demanda, y de las áreas rurales y forestales debe elaborarse desde un enfoque integrado a nivel de la cuenca y con el principio de solidaridad cabecera-tramo bajo y entre tierras interiores y regiones costeras. Debe armonizar todas las políticas sectoriales: agricultura, energía, turismo, medioambiente y urbanístico para facilitar el arbitraje de los recursos hídricos y de suelo asignados a los diferentes usos.

### 5.3. La aforestación para combatir la desertización de las zonas áridas exige aunar esfuerzos

Los procesos biofísicos que conducen a la desertización consisten, principalmente, en el aumento de la escorrentía y la erosión del suelo como resultado de la reducción importante de la cubierta. Se pueden prevenir o recuperar por medio de la aforestación, si esta se diseña adecuadamente, con la atención debida al equilibrio hídrico de la cuenca.

La aforestación en zonas áridas y semiáridas requiere técnicas de retención de agua como la formación de estructuras aterrazadas en bancales o la construcción de pequeñas barreras que ayuden a embalsar el agua.

La agroforestería puede incrementar la productividad de la aforestación en los terrenos secos.

La regeneración de la cubierta y el sotobosque en las aforestaciones llevadas a cabo en las áreas secas es el principal obstáculo para la sostenibilidad de los bosques. Sin embargo el fomento de la regeneración con especies nativas en los bosques de zonas áridas puede incrementar las especies y la diversidad estructural así como los servicios de los ecosistemas.

### 5.4. Mantener saludables los ecosistemas acuáticos y de ribera del Mediterráneo: retos y soluciones mediante la gestión de los bosques de ribera

Los bosques de ribera juegan un papel principal en el mantenimiento de la biodiversidad, la regulación de los flujos de energía y nutrientes entre los medios acuático y terrestre y en el mantenimiento saludable de los ecosistemas acuáticos adyacentes y los recursos hidrológicos. En el Mediterráneo, su futuro está en peligro por el aumento de la sequía, el uso excesivo del agua y la contaminación.

Los bosques de ribera afectan al balance hídrico anual reduciendo la descarga hídrica.

Los bosques de ribera actúan como filtro de los agentes contaminantes y mejoran la calidad del agua.

La gestión de los bosques de ribera constituye una herramienta para mejorar la calidad del agua y para proteger los hábitats de la ribera y el río –una necesidad en los vulnerables entornos mediterráneos pero un tema político que se suele pasar por alto–.

### 5.5. Economía del agua y los bosques: cuestiones y recomendaciones políticas

En un contexto de escasez de recursos hídricos, las políticas predominantemente orientadas al suministro han conducido al mal uso y exceso de consumo de agua en la región mediterránea. Es posible revertir estas tendencias actuando, tanto sobre la demanda como sobre el suministro, por medio de instrumentos económicos adecuados.

Poner un precio y comerciar con el agua adecuadamente puede ayudar a reducir su uso excesivo.

Mejorar la conservación de los ecosistemas forestales como proveedores de agua resulta posible mediante el pago, por parte de los consumidores de agua limpia del tramo bajo a los consumidores de la cabecera, lo que puede permitir internalizar lo que de otra manera sería una externalidad.

# Glosario

**E**ste glosario se ha compilado a partir de varias fuentes: Bank-Netherlands 2001, Water partnership programme AO 2004, Glossary of water terms del US Geol. Survey [www.ga.water.usgs.gov/edu/dictionary.html](http://www.ga.water.usgs.gov/edu/dictionary.html)

## Acuífero

Formación(es) geológica(s) o estructuras que almacenan y/o transmiten agua a pozos y manantiales, por ejemplo. El uso del término se suele restringir a las formaciones que contienen agua capaces de proveerla en suficiente cantidad como para constituir un suministro utilizable para consumo de las personas.

## Agua subterránea

I) Agua que fluye o se desplaza hacia abajo y satura el suelo o la roca, suministrando agua a manantiales y pozos. La superficie superior de la zona saturada recibe el nombre de capa freática.

II) Agua almacenada subterráneamente en grietas de las rocas y en los poros de los materiales geológicos que forman la corteza terrestre.

## Agua superficial

Agua en la superficie de la Tierra como la de los torrentes, ríos, lagos o embalses.

## Calidad del agua

Término usado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua, normalmente con respecto a su idoneidad para un propósito en particular.

## Capa freática

La parte alta de la superficie del agua en la zona saturada de un acuífero.

## Captura de lluvia

La recolección del agua de lluvia desde los tejados o áreas del suelo convenientemente preparados para ello, que proporciona agua potable, para riego, consumo humano o recarga de acuíferos.

## Caudal

Descarga de agua que tiene lugar por un canal natural. Término más general que escorrentía, se puede aplicar a la descarga tanto si está afectada por división o regulación, como si no lo está.

## Caudal de base

Flujo sostenido de un cauce en ausencia de escorrentía. Incluye flujos naturales e inducidos por el hombre. Un caudal de base natural se nutre en gran parte de descargas de aguas subterráneas.

## Ciclo hidrológico

Transferencia cíclica de vapor de agua desde la superficie de la Tierra, vía la evapotranspiración, a la atmósfera; desde la atmósfera vía la precipitación, de vuelta a la Tierra, y a través de la escorrentía a los torrentes, ríos y lagos y, finalmente, a los océanos.

## Conductancia estomática

Velocidad a la que el agua se evapora desde los poros de una planta, está directamente relacionada con el tamaño relativo de la apertura del estoma. Básicamente, cuanto mayor es el ritmo de evaporación, mayor es la conductancia de la hoja. Es importante tener en cuenta que la humedad, el estado de hidratación de la hoja y la intensidad de la luz, entre otros, son factores que también afectan a la conductancia estomática.

## Curso

Término general para una masa de agua fluida; el curso que contiene agua, al menos una parte del año. En hidrología, se suele aplicar al agua que fluye en regueros naturales, en contraposición a la que fluye por un canal.

## Crecida

Escorrentías de corta duración (menos de seis horas) en cauces pequeños y medianos que alimentan los acuíferos mediante las pérdidas por transmisión pero suponen un riesgo significativo para la vida y las propiedades.

## Cuenca (o cuenca fluvial)

I) Usado con frecuencia para describir una región drenada por un sistema fluvial grande (supone una cuenca de gran extensión).

II) Área de drenaje natural dentro de los límites definidos por las divisorias de agua. La escala de una cuenca puede variar de unas pocas hectáreas a miles de kilómetros cuadrados.

## Cuenca hidrográfica

Divisoria entre dos áreas que son drenadas por diferentes sistemas fluviales. El uso común de este término se refiere tanto a la divisoria misma como al área natural de drenaje en ese límite.

#### Descarga

Volumen de agua que pasa por una localización dada en un período de tiempo dado.

#### Escorrentía

La parte de la precipitación, fusión de nieve o agua de riego que aparece en cauces superficiales no controlados, ríos, drenajes o alcantarillado.

#### Filtración

I) Movimiento lento del agua a través de pequeñas grietas, poros, intersticios, etc., de un material hacia el interior o el exterior de un cuerpo de superficie o agua subsuperficial.

II) Pérdida de agua por infiltración al interior del suelo desde los canales, zanjas, laterales, cursos de agua, embalses, instalaciones de almacenaje y otras masas de agua, o de un campo.

#### Flujo de retorno

I) La parte de un flujo desviado no usada para consumo y devuelta a su fuente original o a otro cuerpo de agua.

II) (riego) Agua de drenaje de los campos de regadío que se reintroduce en el sistema hídrico para ser usada en aguas abajo.

#### Gestión de la cuenca hidrográfica

La gestión de las cuencas hidrográficas es una cuestión técnica y social. I) Técnica: reducir la erosión del suelo, promover la cubierta vegetal y gestionar el ciclo hidrológico. II) Social: promover los procesos de negociación entre todas las partes interesadas en una cuenca hidrográfica, (armonizando las actividades de numerosos usuarios que tienen objetivos variados y conflictivos). El propósito es asegurar que los objetivos medioambientales están bien integrados en las aspiraciones económicas, sociales y culturales locales.

#### Índice de área foliar

El cociente entre la superficie total de las hojas y el área de suelo sobre el que crece la vegetación.

#### Infiltración

Flujo de agua desde la superficie del suelo hacia la zona sub-superficial.

#### Inundación

Desbordamiento de agua sobre el suelo que se usa o se puede usar por el hombre y no está cubierto de agua en condiciones normales. Las inundaciones tienen dos características esenciales: la inundación del suelo es temporal y el suelo es adyacente a, e inundado por, un desbordamiento de un río, cauce, lago u océano.

#### IPCC

Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*).

#### Lecho rocoso

Roca sólida bajo el suelo y la roca superficial. Término general que designa a la roca sólida que descansa bajo el suelo, los sedimentos o cualquier otro material no consolidado.

#### Lixiviación

Proceso mediante el cual los materiales solubles del suelo, como sales, nutrientes, pesticidas químicos o contaminantes, son arrastrados a capas inferiores del suelo o son disueltos y transportados por el agua.

#### Onda de Rossby

Las ondas de Rossby (o planetarias) son meandros gigantes en vientos de gran altitud que ejercen una crucial influencia en la distribución espacial del tiempo atmosférico, causando correlaciones espaciales positivas o negativas.

#### Oscilación mediterránea

Teleconexión existente entre las condiciones atmosféricas occidentales (Argelia) y orientales (El Cairo) que se relaciona con la temperatura y las series cronológicas de precipitación.

#### Percolación

I) Movimiento del agua a través de los orificios de la roca o del suelo.

II) Entrada de una fracción del caudal al interior de los materiales del canal para contribuir a la reposición del agua subterránea.

#### Pérdidas por transmisión

Pérdida del flujo de agua a lo largo de los cauces debido a la infiltración profunda en el depósito aluvial o en la roca madre permeable. Suele ser el primer mecanismo de recarga del acuífero en climas secos.

#### Porosidad

Medida de la capacidad de contener agua de la roca subsuperficial. Con respecto al movimiento del agua, no sólo el valor de la porosidad resulta importante, sino el tamaño de los poros y el grado en el que están interconectados, puesto que los poros en una formación pueden estar abiertos o interconectados, o cerrados y aislados. Por ejemplo, la arcilla puede tener una porosidad muy elevada con respecto al contenido potencial de agua, pero constituye un medio pobre como acuífero pues los poros acostumbran a ser pequeños.

#### Caudal punta

Descarga máxima instantánea de un cauce o un río en un emplazamiento dado. Suele tener lugar en el momento de fase máxima o cerca de él.

#### Recarga

Alimentación de agua subterráneas (pozos y manantiales) por la percolación profunda efectiva de agua.

**Recarga de acuíferos subterráneos**

Afluencia de agua a una reserva subterránea desde la superficie. La infiltración de la precipitación y su movimiento hacia la capa freática es una forma de recarga natural. También, el volumen de agua añadida mediante este proceso.

**Servicios Medioambientales (ES)**

Término genérico que designa las externalidades positivas o beneficios que se generan por un determinado uso del suelo. Típicamente existen mercados limitados para los ES y no se paga compensación por proporcionarlos. Como resultado, se tiende a no tomarlos en consideración en la toma de decisiones sobre el uso del suelo.

**Suelo fersialítico**

Suelo rojo desarrollado en regiones mediterráneas y subtropicales.

**Suelo isohúmico**

Suelo dominado por la arcilla, con profunda incorporación a través de los procesos biológicos de materia orgánica estabilizada durante una extensa fase de maduración climática.

**Suelo vértico**

Suelos arcillosos con propiedades de contracción y dilatación que muestran grandes grietas cuando están secos y presentan agregados lenticulares estructurales en profundidad.

**Tipología climática de Köppen**

El sistema de clasificación climática de Köppen se usa a nivel mundial. Los límites de los tipos de climas se han seleccionado teniendo en cuenta la distribución de la vegetación nativa. Combina el promedio de temperatura y precipitación anual y mensual, así como la estacionalidad de la precipitación.

**Teleconexión**

En ciencias atmosféricas se refiere a las anomalías climáticas relacionadas entre sí a grandes distancias (a miles de kilómetros).

**Turbidez**

Cantidad de partículas sólidas en suspensión en el agua y que causan que los rayos de luz se dispersen al atravesar el agua.

**Zona insaturada**

La zona inmediatamente por debajo de la superficie del suelo donde los poros contienen tanto agua como aire, pero no están totalmente saturados de agua. Estas zonas difieren de un acuífero, donde los poros sí están saturados de agua.

# What Science Can Tell Us



Vivimos en un entorno intrincado y cambiante con relaciones e interdependencias entre ecosistemas, sociedad, economía y medio ambiente. La serie del EFI "Lo que la ciencia nos puede explicar" se basa en revisiones científicas colectivas de expertos que proporcionan información básica interdisciplinaria sobre temas forestales que resultan clave, y a menudo complejos, para los gestores, los ciudadanos y la sociedad en general.



EUROPEAN FOREST INSTITUTE

Torikatu 34, FI-80100 Joensuu, Finland  
Tel. +358 10 773 4300, Fax. +358 10 773 4377  
[www.efi.int](http://www.efi.int)

El Instituto Forestal Europeo (EFI) es una organización internacional establecida por los Estados Europeos. EFI lleva a cabo investigación y proporciona información sobre temas relacionados con el bosque. Facilita y estimula las redes de trabajo relacionadas con el bosque al tiempo que impulsa la generación de información objetiva relevante para la toma de decisiones sobre los bosques y la silvicultura. EFI también apoya la investigación forestal y la información científica sólida como base de la gestión de los bosques.